

# 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地 深层土壤干燥化效应

李 军<sup>1,2</sup>, 陈 兵<sup>1</sup>, 李小芳<sup>1</sup>, 程积民<sup>2</sup>, 郝明德<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100, 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 田间实地测了黄土高原不同干旱类型区不同生长年限苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度, 分析和比较了各类苜蓿草地深层土壤干燥化效应特征。结果表明, 在半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区, 各类苜蓿草地土壤湿度平均值分别为 10.84%、7.07% 和 5.45%, 明显低于当地土壤稳定湿度值和荒草地土壤湿度值, 土壤水分过耗量分别为 540.2、641.1mm 和 455.0mm, 平均土壤干燥化速度分别为 61.2、101.9mm/a 和 99.0mm/a。3 种类型区各类苜蓿草地年降水入渗深度分别为 187.8、144cm 和 173cm, 降水入渗深度以下深层土壤湿度保持稳定的干燥化状态; 土壤干燥化强度随苜蓿草地生长年限延长而加剧, 3 年生苜蓿草地为中度干燥化强度, 土壤干层厚度达到 500~760cm, 4 年生以上苜蓿草地已达到严重干燥化和强烈干燥化强度, 土壤干层厚度超过 940~1000cm; 通过粮草轮作使苜蓿草地土壤湿度恢复到当地土壤稳定湿度分别需要 6.11a 和 18a 以上。

关键词: 黄土高原; 苜蓿草地; 土壤湿度; 土壤干燥化

文章编号: 100020933(2007)0120075215 中图分类号: Q142, Q948, S152.7 文献标识码: A

## Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China

Li Jun<sup>1,2</sup>, Chen Bing<sup>1</sup>, Li Xiaofang<sup>1</sup>, Cheng Jimin<sup>2</sup>, Hao Mingde<sup>2</sup>

1 College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100 China

2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling 712100 China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27(1): 0075~0089

Abstract Soilmoistures in 0—1000cm soil layers on different growth age alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau were measured and soil desiccation effects on alfalfa grasslands were analyzed and compared. Average soil moistures in 0—1000cm soil layers on alfalfa grasslands of semihumid area, semiarid area and semiarid drought prone area were 10.84%, 7.07% and 5.45% respectively which were obviously lower than local soil stable moisture and soil moisture on natural grassland. Soil water overuse amounts of alfalfa grasslands of the 3 areas were 540.2, 641.1mm and 455.0mm, and average speeds of soil desiccation were 61.2mm, 101.9mm and 99.0mm per year separately. Average annual rainfall infiltration depths of alfalfa grasslands on the 3 different rainfall areas were 187.8, 144cm and 173cm separately and soil moisture of deep soil layers below rainfall infiltration depth remained in a stable desiccated condition. As alfalfa growth aged, soil desiccation intensity strengthened. Soil desiccation intensities was medium desiccated on the 3

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40371077 和 30471024)

收稿日期: 2006208210 修订日期: 2006212230

作者简介: 李军 (1964~), 男, 甘肃涇川人, 博士, 教授, 主要从事旱区农业生态、高效农作制度和农业生产系统模拟等领域的研究与教学工作。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40371077 & No. 30471024)

Received date 2006208210 Accepted date 2006212230

Biography: Li Jun, Ph.D., Professor, mainly engaged in agroecology of dryland, high efficient farming system and agricultural production system simulation. E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

years alfalfa grassland and were serious desiccated and strong desiccated on the 4 years or over alfalfa grasslands. Thickness of desiccated soil layers were 500–760cm on the 3 years alfalfa grasslands and were over 940–1000cm on the 4 years or over alfalfa grasslands. Years required for soil moisture restoration of desiccated soil layers to local soil stable moisture with alfalfa grain crop rotations on the 3 different rainfall areas were over 6 years, 11 years and 18 years separately.

**Key Words** the Loess Plateau, alfalfa grassland, soil moisture, soil desiccation

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 以其抗旱、耐寒、耐瘠、截流、保土等多种生态适应性, 成为黄土高原普遍栽培的优质豆科牧草。近年来, 紫花苜蓿草地土壤干燥化和生产力退化问题日益引起重视<sup>[1~7]</sup>。土壤干燥化是黄土高原干旱气候、风成土壤和高产作物(林草)等因素综合作用下形成的独特土壤水文现象, 是由于自然降水、土壤贮水和作物(林草)耗水关系失衡, 导致土壤水库深层贮水量显著降低<sup>[8~11]</sup>。土壤干燥化所导致的土壤干层具有较低的土壤含水量范围、位于降水渗深以下土体部位、形成之后具有相对持久性等基本特征, 土壤干燥化会引起人工林草生长逐渐衰败和农田作物产量波动性加剧<sup>[13, 8~12]</sup>。针对黄土高原苜蓿草地土壤干燥化的有关研究, 主要集中于苜蓿草地土壤水分利用特征及其对苜蓿生长和产量影响方面, 韩仕峰调查和分析了宁南山区 1~12 年生苜蓿草地产草量和土壤水分利用特征<sup>[2]</sup>, 李玉山利用长武旱塬区长期定位试验数据分析了苜蓿草地的生产力动态和土壤水分环境演变<sup>[3]</sup>, 张春霞等比较分析了黄土高原沟壑区不同生长年限苜蓿草地土壤水分剖面分布特征<sup>[5]</sup>, 程积民等研究了黄土丘陵区(固原)苜蓿草地生物量变化规律和土壤水分过耗与恢复特征<sup>[7]</sup>。这些已有相关研究或者未能涵盖黄土高原不同干旱类型区, 或者对苜蓿草地土壤湿度测定深度不足, 缺乏对不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化程度的定量评价和的区域分布比较研究。本研究通过对黄土高原 3 种干旱类型区各类苜蓿草地深层土壤湿度观测和分析, 比较分析各类苜蓿草地土壤水分过耗量、土壤湿度剖面分布特征及其年度和季节变化规律, 定量评价苜蓿草地土壤干燥化强度、土壤干层厚度和土壤干层消除所需时间, 揭示黄土高原不同干旱类型区不同生长年限旱作苜蓿草地深层土壤干燥化特征及其区域分布规律, 为黄土高原苜蓿草地水分可持续利用和人工苜蓿草地建设提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 试验站概况简介

按照黄土高原气候和植被地域分异规律, 选择了南部半湿润高原沟壑区的长武和镇原、中部半干旱丘陵沟壑区的固原、北部半干旱偏旱丘陵区的海原等 4 个相关旱作农业或农业生态试验站开展试验研究。位于渭北旱塬的中国科学院水利部水土保持研究所陕西长武(王东)农业生态试验站, 纬度 35.26°N, 经度 107.76°E, 海拔 1220.0m, 年均气温 9.1e, \ 10e 年积温 3025.0e, 年降水量 576.4mm, 年蒸发量 1564.5mm, 土壤为黑垆土, 田间持水量和凋萎湿度分别为 22% 和 9%。位于陇东旱塬的甘肃农业科学院镇原(上肖)旱作农业试验站, 纬度 35.56°N, 经度 107.76°E, 海拔 1290.0m, 年均气温 8.3e, \ 10e 年积温 3191.1e, 年降水量 541.8mm, 年蒸发量 1481.6mm, 黑垆土。位于宁南山区的中国科学院水利部水土保持研究所宁夏固原(上黄)农业生态试验站, 纬度 36.06°N, 经度 106.46°E, 海拔 1676.0m, 年均气温 6.1e, \ 10e 年积温 2259.7e, 年降水量 455.4mm, 年蒸发量 1772.5mm, 土壤为黄绵土, 田间持水量和凋萎湿度分别为 19% 和 9%。位于宁南山区的西北农林科技大学宁夏海原(贾塘)旱作农业试验站, 纬度 36.56°N, 经度 105.86°E, 海拔 1822.0m, 年均气温 7.13e, \ 10e 年积温 2392.3e, 年降水量 386.1mm, 年蒸发量 2157.4mm, 土壤为黄绵土, 田间持水量和凋萎湿度分别为 17% 和 4.9%。黑垆土和黄绵土的土壤容重均为 1.30 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 土壤湿度测定方法

于 2003~2005 年相继在长武、镇原、固原、海原等试验站分别选择有代表性的紫花苜蓿草地进行深层土壤湿度测定。具体测定时间与草地选择情况如下:

(1)南部半湿润高原沟壑区 在镇原站选择了5年生、10年生、15年生和23年生旱塬苜蓿草地,分别于2003年4月下旬、2004年5月上旬、2005年8月中旬连续3次测定了0~1000cm(部分草地为0~1200cm)土层土壤湿度。于2005年8月中旬在长武站测定了3年生苜蓿草地0~800cm土层土壤湿度,并以2001年10月测定的荒草地和休闲裸地土壤湿度为对照。

(2)中部半干旱丘陵沟壑区 在固原站选择了3年生、6年生和9年生苜蓿草地,于2004~2005年4月、6月、8月和10月份连续测定苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度,并于2005年8月测定了5年生苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度和荒草地0~600cm土层土壤湿度。

(3)北部半干旱偏旱丘陵区 在海原站,于2004年7月中旬测定了4年生、7年生和11年生苜蓿草地0~700cm土层土壤湿度,于2005年8月下旬测定了3年生、6年生和10年生苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度,并同期测定了荒草地土壤湿度作为对照。

土壤湿度采用土钻取样、烘干法测定,取土最大深度为700~1200cm,每20cm取样一次,在105℃烘干至恒重,分别称量湿土重、干土重和铝盒重,最后计算各层土壤重量含水量。

虽然上述各类型区不同生长年限苜蓿草地土壤湿度测定日期不尽一致,但在结果分析中比较苜蓿草地土壤含水量、土壤湿度剖面分布和土壤干燥化强度时,均采用了2005年8月份测定的土壤湿度值,其它日期的测定值只用于苜蓿草地土壤湿度季节和年度变化、土壤湿度恢复状况等分析方面。

### 1.3 土壤干燥化强度评价方法

黄土高原旱地土壤干燥化后土壤干层的湿度下限[凋萎湿度,上限[土壤稳定湿度。土壤稳定湿度是指在黄土高原干旱气候、土壤质地、自然植被等因素作用下,通常旱地土壤能够长期维持的土壤湿度,其值约为田间持水量的50%~79%<sup>[8-10]</sup>。土壤稳定湿度与田间持水量之间的水分亏缺现象应视为干旱气候环境下旱地土壤正常状态的水分亏缺,不属于土壤干燥化的范围。由于半干旱地区的土壤湿度随年度和季节降水不断发生变化,在短期内深层土壤稳定湿度值不易直接测量和准确界定。在本研究中,土壤稳定湿度值采用土壤凋萎湿度与田间持水量的平均值计算,取值范围介于10%~16%之间,约为田间持水量的50%~70%。该值反映了某一种土壤对水分保持能力的中间状态,不随降水量的年度和季节变化而发生变化,便于在不同降水年型、不同季节和不同降水类型区之间比较土壤干燥化强度。

本研究计算所得的土壤稳定湿度值与黄土高原旱作农田正常生产条件下土壤湿度值的平均状态相一致。长武、镇原、固原和海原的土壤稳定湿度值分别为15.50%、15.50%、12.00%和10.79%,而本课题组于2005年8月份测定的当地主要大田粮食作物0~6m土层土壤湿度平均值依次为15.54%、15.52%、11.77%和9.14%。另外,根据土壤水分特征曲线计算所得的长武0~200cm土层土壤稳定湿度值为15.9%<sup>[12]</sup>,和本研究的计算结果完全一致。

至今尚未见到关于土壤干燥化强度评价指标的报道,有关研究中多以土壤湿度值的高低比较土壤干燥化程度,但在不同降水类型区、不同类型土壤和不同类型植被之间难以直接比较。为了便于定量描述干燥化程度,比较苜蓿草地土壤干层的剖面分布特征和区域分布规律,本研究提出了一个定量描述土壤干燥化强度的概念)))土壤干燥化指数SDI(soil desiccation index),定义为某一土层实际土壤有效含水量占该层土壤稳定有效含水量比值的百分数,其含义为某一土层可供植物吸收利用的土壤实际有效含水量占该层土壤正常有效含水量的比重,公式表达为:

$$SDI = \frac{SM - WM}{SSM - WM} @100\% \quad (1)$$

式中,SDI为土壤干燥化指数,SM为土壤湿度,WM为凋萎湿度,SSM为土壤稳定湿度。土壤湿度、凋萎湿度和土壤稳定湿度用重量含水量百分数或者某一土层的水分毫米数表示。土壤干燥化指数SDI值越小,表明土壤干燥化强度越高,可供植物吸收利用的土壤有效含水量也越少。土壤干燥化指数消除了降水量、土壤种类和植被类型等因素的影响,可以应用于不同区域、土壤和植被类型之间土壤干燥化强度的差异比较。

依据土壤干燥化指数SDI值的大小,结合苜蓿草地生长状态和受干旱胁迫的程度,土壤干燥化强度可划

分为6级: (1)若  $SDI \geq 100\%$ , 为无干燥化; (2)若  $75\% \leq SDI < 100\%$ , 为轻度干燥化; (3)若  $50\% \leq SDI < 75\%$ , 为中度干燥化; (4)若  $25\% \leq SDI < 50\%$ , 为严重干燥化; (5)若  $0 \leq SDI < 25\%$ , 为强烈干燥化; (6)若  $SDI < 0$  为极度干燥化。其中, 无干燥化和极度干燥化是土壤干燥化的2种极端状态, 分别表示苜蓿草地土壤湿度高于土壤稳定湿度值和低于土壤凋萎湿度值的情况; 轻度干燥化、中度干燥化、严重干燥化和强烈干燥化等4级是在  $SDI$  取值  $0 \sim 100\%$  范围内, 按照  $SDI$  每降低  $25\%$ , 可供植物吸收利用的土壤有效含水量明显减少、土壤干旱胁迫程度明显上升、苜蓿生长明显滞缓为依据而划分的。例如, 若  $SDI < 50\%$ , 就意味着土壤实际有效含水量尚达不到土壤正常有效含水量的  $1/2$ , 表明土壤干燥化程度已经十分严重; 若  $SDI < 25\%$ , 就表明土壤实际有效含水量尚达不到土壤正常有效含水量的  $1/4$ , 表明土壤干燥化程度已经十分强烈。这样划分为6个级别, 有利于量化描述和区分不同降水地区、不同生长年限苜蓿草地土壤干燥化程度。如果分级过少, 难以区分不同苜蓿草地的土壤干燥化强度差异。

## 2 结果分析

### 2.1 苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤含水量

#### 2.1.1 半湿润区

在黄土高原南部半湿润旱塬区, 长武 3年生苜蓿草地 0~800cm, 镇原 6年生、12年生、17年生和 25年生苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度平均值  $10.53\% \sim 13.37\%$ , 平均值  $11.39\%$ , 均明显低于当地土壤稳定湿度值  $15.50\%$  和荒草地土壤湿度值  $18.19\%$  (表 1)。3~25年生等 5类苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤含水量  $1369.3 \sim 1737.5\text{mm}$ , 平均值  $1474.8\text{mm}$ , 土壤有效含水量  $199.3 \sim 567.5\text{mm}$ , 平均值  $304.8\text{mm}$ 。相对于土壤稳定湿度值, 5类苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤水分过耗量  $277.5 \sim 645.7\text{mm}$ , 平均水分过耗量为  $540.2\text{mm}$ , 平均土壤干燥化速度  $24.9 \sim 107.6\text{mm/a}$ , 平均值  $61.2\text{mm/a}$ 。其中, 以 6年生苜蓿草地土壤含水量最低, 其次为 17年生和 25年生苜蓿草地。土壤干燥化速度也以 6年生苜蓿草地最快, 其次为 3年生草地。随着草地生长年限延长, 土壤干燥化程度加剧, 年均土壤干燥化速度趋于减缓。

#### 2.1.2 半干旱区

在黄土高原半干旱丘陵沟壑区, 固原 4年生、7年生、10年生苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度平均值分别为  $7.54\%$ 、 $7.24\%$  和  $6.43\%$ , 平均值  $7.07\%$ , 明显低于当地土壤稳定湿度值  $12.00\%$  和荒草地土壤湿度值  $11.49\%$  (表 1)。3类苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤含水量  $835.3 \sim 980.8\text{mm}$ , 平均值  $918.9\text{mm}$ , 土壤有效含水量  $185.3 \sim 330.8\text{mm}$ , 平均值  $268.9\text{mm}$ , 土壤水分过耗量  $579.2 \sim 724.7\text{mm}$ , 平均值  $641.1\text{mm}$ , 土壤干燥化速度  $72.5 \sim 144.8\text{mm/a}$ , 平均值为  $101.9\text{mm/a}$ 。随草地生长年限延长, 苜蓿草地土壤干燥化速度减缓, 由 4年生的  $144.8\text{mm/a}$  降低到 10年生的  $72.5\text{mm/a}$ 。

#### 2.1.3 半干旱偏旱区

在黄土高原半干旱偏旱丘陵区, 海原 3年生、6年生和 10年生苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度平均值依次为  $7.90\%$ 、 $5.70\%$  和  $5.82\%$ , 平均值  $6.47\%$ , 明显低于当地土壤湿度值  $10.79\%$  和天然荒草地土壤湿度值  $9.58\%$  (表 1)。3类苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤含水量  $741.2 \sim 1026.7\text{mm}$ , 平均值  $841.7\text{mm}$ , 土壤有效含水量  $156.2 \sim 441.7\text{mm}$ , 平均值  $256.7\text{mm}$ , 土壤水分过耗量为  $370.8 \sim 656.3\text{mm}$ , 平均值  $455.0\text{mm}$ , 而荒草地土壤水分过耗量只有  $152.4\text{mm}$ 。苜蓿草地土壤干燥化速度  $64.0 \sim 123.6\text{mm/a}$ , 平均值为  $99.0\text{mm/a}$ 。3年生苜蓿草地土壤干燥化速度最快, 其次为 6年生, 随苜蓿生长年限延长, 苜蓿草地土壤干燥化速度逐渐减缓。

#### 2.1.4 不同干旱类型区比较

将半湿润区镇原 6年生、半干旱区固原 5年生和半干旱偏旱区海原 6年生等各类型区中典型苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤含水量和各类型区各类苜蓿草地含水量平均值比较列于表 2。随着半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区降水量逐渐减少, 典型苜蓿草地和苜蓿草地平均土壤湿度和土壤有效含水量也呈现出逐渐降低趋势。就典型苜蓿草地而言, 半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区土壤水分过耗量依次为  $645.7\text{mm}$ 、 $722.1\text{mm}$  和  $656.3\text{mm}$ , 平均土壤干燥化速度依次为  $107.6\text{mm/a}$ 、 $144.4\text{mm/a}$  和  $109.4\text{mm/a}$ 。半干旱区苜蓿草

地土壤干燥化速度最快。就草地平均值而言,半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区土壤水分过耗量分别为 5401.2mm、641.1mm 和 455.0mm,分别每年多耗水 61.2mm、101.9mm 和 99.0mm,也是以半干旱区最高,其次为半干旱偏旱区。

表 1 黄土高原不同干旱类型区不同生长年限苜蓿草地和荒草地 0~1000cm 土层土壤含水量比较

Table 1 comparison of soil water amount in 0~1000cm soil layers on different growth age alfalfa grasslands and natural grassland of different rainfall areas of the Loess Plateau

干旱类型区 Dry land type	草地类型 Grassland type	土壤湿度 Soil moisture (%)	土壤含水量 Soil water amount (mm)	土壤有效含水量 Available soil water amount (mm)	每米土层土壤		平均土壤 干燥化速度 Speed of soil desiccation (mm/a)
					有效含水量 Available soil water in every 1m soil layer (mm/m)	土壤水分过耗量 Amount of soil water overuse (mm)	
半湿润区 Semi humid area	3年生 3 years	13.37	1737.5	567.5	56.8	277.5	92.5
	6年生 6 years	10.53	1369.3	199.3	19.9	645.7	107.6
	12年生 12 years	11.46	1489.7	319.7	32.0	525.3	43.8
	17年生 17 years	10.65	1384.6	214.6	21.5	630.4	37.1
	25年生 25 years	10.72	1393.0	223.0	22.3	622.0	24.9
	荒草地 Natural grassland	18.15	2359.7	1189.7	119.0	-	-
	休闲裸地 Bare fallow land	21.80	2834.5	1664.5	166.5	-	-
	凋萎湿度 Wilted moisture	9.00	1170.0	0	-	-	-
	土壤稳定湿度 Soil stable moisture	15.50	2015.0	845.0	84.5	-	-
	田间持水量 Field capacity	22.00	2860.0	1690.0	286.0	169.0	-
半干旱区 Semi arid area	4年生 4 years	7.54	980.8	330.8	33.1	579.2	144.8
	7年生 7 years	7.24	940.6	290.6	29.1	619.4	88.5
	10年生 10 years	6.43	835.3	185.3	18.5	724.7	72.5
	荒草地 Natural grassland	11.45	1488.5	838.5	83.9	71.5	-
	凋萎湿度 Wilted moisture	5.0	650.0	0	-	-	-
	土壤稳定湿度 Soil stable moisture	12.0	1560.0	910.0	91.0	-	-
田间持水量 Field capacity	19.00	2470.0	1820.0	182.0	-	-	
半干旱 偏旱区 Semi arid drought prone area	3年生 3 years	7.90	1026.7	441.7	44.2	370.8	123.6
	6年生 6 years	5.70	741.2	156.2	15.6	656.3	109.4
	10年生 10 years	5.82	757.2	172.2	17.2	640.3	64.0
	荒草地 Natural grassland	9.58	1245.1	660.1	66.0	152.4	-
	凋萎湿度 Wilted moisture	4.50	585.0	0	-	-	-
	土壤稳定湿度 Soil stable moisture	10.75	1397.5	812.5	81.3	-	-
田间持水量 Field capacity	17.00	2210.0	1625.0	162.5	-	-	

## 2.2 苜蓿草地土壤湿度剖面分布特征

### 2.2.1 半湿润区

南部半湿润旱塬区 3年生、6年生、12年生、17年生和 25年生苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度剖面分

布特征如图 1 所示,并以田间持水量、凋萎湿度和荒草地为对照。从图 1 可以看出,除表层 0~40cm 土层土壤湿度因雨后不久而较高外,6年生、12年生、17年生和 25年生苜蓿草地 40~1000cm 土层土壤湿度差距不大,基本维持在 7%~13% 范围内,均明显低于田间持水量 22.0% 和荒草地 18.15%,也低于当地土壤稳定湿度值 15.9%。3年生苜蓿草地在 40~300cm 土层土壤湿度较低,在 300cm 以下土层土壤湿度逐渐升高,在 540cm 以下土层土壤湿度达到 15.9% 以上,表明南部半湿润旱塬区 3年生苜蓿草地在 540cm 以下土层尚未出现土壤干燥化现象。旱塬区各类苜蓿草地在 160~300cm 土层范围内,均出现了土壤湿度低于凋萎湿度 9% 的极度耗水干燥层。同时,土壤湿度低于 10% 的强烈耗水干燥层在 3年生苜蓿草地上分布于 80~280cm,在 6年生、12年生、17年生和 25年生苜蓿草地分布于 120~520cm 土层范围,表明随苜蓿生长年限延长和苜蓿根系下扎,苜蓿根系的强烈耗水土层深度逐渐下移,但 6年生以后强烈耗水干燥层基本维持在 120~500cm 左右土层范围。

表 2 黄土高原 3 种干旱类型区苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤含水量和土壤干燥化速度比较

Table 2 Comparison of soil water amounts and soil desiccation speeds in 0~1000cm soil layers on alfalfa grasslands in three rainfall areas of the Loess Plateau

干旱类型区 Dryland type	草地类型 Grassland type	土壤湿度 Soil moisture (%)	土壤含水量 Soil water amount (mm)	土壤有效含水量 Available soil water amount (mm)	土壤水分过耗量 Amount of soil water overuse (mm)	平均土壤干燥化速度 Speed of soil desiccation (mm/a)
半湿润区 Semi-humid area	典型草地 Typical grassland	10.53	1369.3	199.3	645.7	107.6
	草地平均 Grassland average	11.35	1474.8	304.8	540.2	61.2
半干旱区 Semi-arid area	典型草地 Typical grassland	6.54	837.9	187.9	722.1	144.4
	草地平均 Grassland average	7.07	918.9	268.9	641.1	101.9
半干旱偏旱区 Semi-arid drought prone area	典型草地 Typical grassland	5.70	741.2	156.2	656.3	109.4
	草地平均 Grassland average	6.47	841.7	256.7	455.0	99.0

在黄土高原南部半湿润旱塬区,若以土壤稳定湿度值 15.9% 作为界定苜蓿草地耗水深度的上限指标值,那么 3年生苜蓿草地最大耗水深度(或者土壤干层分布最大深度)已达 540cm 左右,6年生苜蓿草地已经超过 1000cm。同时,2003年测定的 15年生和 23年生苜蓿草地,2004年测定的 24年生苜蓿草地最大测定深度分别为 1200cm、1160cm 和 1200cm,剖面最底层 1060~1200cm、1060~1160cm 和 1060~1200cm 土层土壤湿度分别为 10.63%~13.69%、11.72%~13.15% 和 11.17%~14.04%,其土壤湿度平均值分别为 13.13%、12.48% 和 12.64%,虽然较其上层土壤湿度有所提高,但仍未达到或者超过土壤稳定湿度 15.9%,表明 15 年以上苜蓿草地最大耗水深度均已超过 1200cm。这 3 次草地土壤湿度测定并未穿透已经形成的土壤干层厚度,表明南部旱塬区苜蓿草地最大耗水深度(或土壤干层分布最大深度)还在 1200cm 以下土层,与有关研究中认为南部旱塬 10年生、15年生和 23年生苜蓿草地干层厚度下限为 900cm、1080cm 和 1100cm 的结论不同<sup>[5]</sup>。

## 2.2.2 半干旱区

黄土高原半干旱区固原 4年生、7年生和 10年生苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度剖面分布特征如图 2 所示。4年生苜蓿草地土壤湿度介于 4.06%~10.71% 之间,在不同土层起伏较为剧烈,其中 460~700cm 强烈耗水土层土壤湿度低于 7%。7年生苜蓿草地土壤湿度变动于 5.49%~15.37% 之间,0~180cm 土层土壤湿

度高于 8%, 180~ 1000cm 土层土壤湿度均低于 8%, 其中 580~ 780cm 强烈耗水层土壤湿度低于 0%。10年生苜蓿草地土壤湿度为 4.74%~ 12.34%, 0~ 120cm 土层土壤湿度高于 8%, 120~ 1000cm 土层土壤湿度均低于 8%, 其中 380~ 880cm 主要耗水层土壤湿度低于 0%, 640~ 700cm 强烈耗水层土壤湿度低于 9%。随着苜蓿草地生长年限延长, 半干旱区苜蓿草地 0~ 1000cm 土层土壤湿度剖面分布趋于稳定和一致, 强烈耗水层厚度和分布深度趋于增加, 土壤干燥化程度趋于加剧, 苜蓿草地最大耗水深度均已超过 1000cm。

2.2.3 半干旱偏旱区

黄土高原半干旱偏旱区海原 3年生、6年生和 10年生苜蓿草地与荒草地 0~ 1000cm 土壤湿度值介于 31.56%~ 17.23%、3.76%~ 10.56%、3.52%~ 10.47% 和 3.72%~ 16.98% (图 3)。在 80~ 440cm 土层内, 3年生苜蓿草地土壤湿度低于 6年生和 10年生苜蓿草地, 在 440~ 1000cm 土层内土壤湿度逐渐升高, 并在 780cm 处超过土壤稳定湿度值 10.79%, 其土壤干层分布深度为 760cm, 其中 200~ 480cm 土壤湿度值小于 5%, 340~ 420cm 土壤湿度值小于 4%。6年生和 10年生苜蓿草地土壤湿度剖面分布特征比较接近和一致, 整个剖面土壤湿度小于土壤稳定湿度值, 它们的土壤干层分布深度均超过 1000cm, 其中 180~ 1000cm 和 160~ 900cm 土壤湿度小于 8%, 240~ 720cm 和 300~ 740cm 土壤湿度值小于 9%, 10年生草地还有较厚土层土壤湿度小于 4%。天然荒草地在 0~ 300cm 土层土壤湿度低于或接近于苜蓿草地, 其中 60~ 240cm 土壤湿度低于 9%, 240~ 560cm 土层土壤湿度介于 9%~ 11% 之间, 在 580~ 960cm 土层土壤湿度介于 1%~ 17% 之间, 在 960~ 1000cm 土层土壤湿度又降低到 10% 以下。在半干旱偏旱地区, 天然荒草地在 0~ 580cm 土层也形成了明显的土壤干层, 但 580cm 以下土层土壤湿度逐渐升高, 明显高于苜蓿草地土壤湿度。

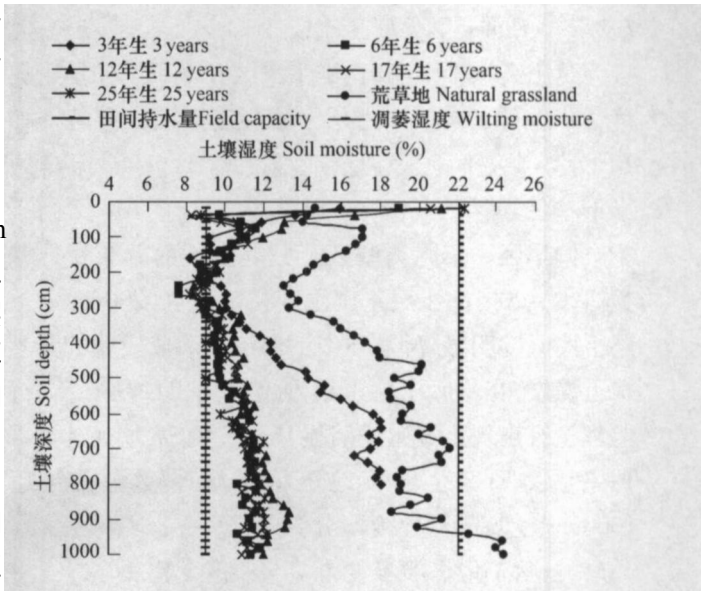


图 1 黄土高原南部旱塬区不同生长年限苜蓿草地土壤湿度剖面特征比较

Fig 1 Comparison of soil moisture distributions in different growth age alfalfa grasslands on south highland plain of the Loess Plateau

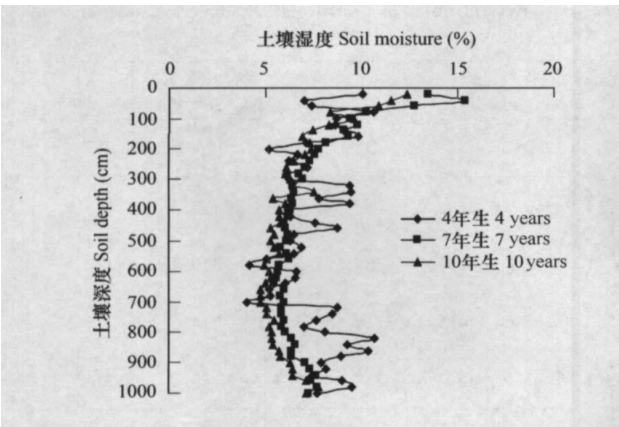


图 2 黄土高原半干旱丘陵区固原不同生长年限苜蓿草地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig 2 Comparison of soil moisture distributions in different growth age alfalfa grasslands at Guyuan of semiarid hilly area on the Loess Plateau

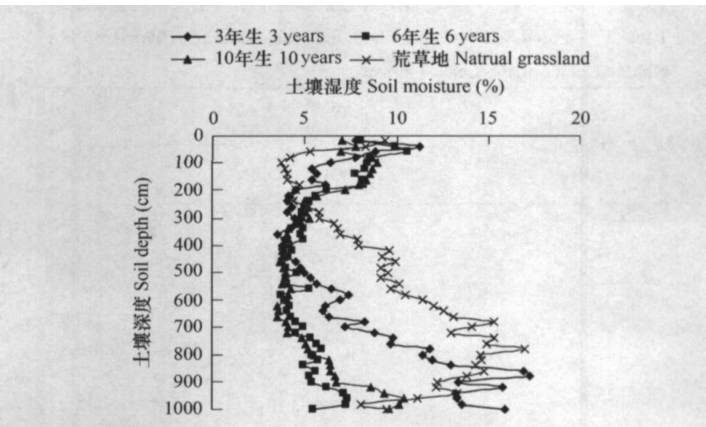


图 3 黄土高原北部半干旱偏旱区海原不同生长年限苜蓿草地和荒草地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig 3 Comparison of soil moisture distributions of different growth age alfalfa grasslands and natural grassland at Haiyuan on north semiarid prone drought area of the Loess Plateau

## 2.2.4 不同干旱类型区比较

黄土高原半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区典型苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度剖面分布特征如图 4 所示。半湿润区苜蓿草地湿度明显高于半干旱区和半干旱偏旱区,在 400cm 以下土层半干旱区又高于半干旱偏旱区。不同类型区土壤湿度剖面分布特征基本类似,0~200cm 土层土壤湿度相对较高,200cm 以下土层土壤湿度明显降低,在中下部深层形成较厚的强烈耗水干燥层,在最底层土层土壤湿度虽然较中层有所升高,但都没有出现土壤湿度明显升高迹象,表明黄土高原 3 种干旱类型区苜蓿草地土壤干层厚度均已经超过 1000cm,土壤干层厚度十分深厚。

## 2.3 苜蓿草地土壤湿度季节与年度变化

### 2.3.1 半湿润区

在黄土高原南部半湿润旱塬区,2003~2005 年各类苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度、土壤含水量和土壤有效含水量年度变化趋势相似,相对于 2003 年,2004 年土壤湿度有所上升,2005 年再度下降,并和 2003 年基本持平(表 3)。2003 年 4 月~2004 年 4 月镇原站降水量高达 668.5mm,10~11 年生、15~16 年生和 23~24 年生苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤水分含量分别增加 130.8mm、88.9mm 和 55.9mm,表现出随苜蓿生长年限延长草地水分恢复量逐渐降低趋势。而 2004 和 2005 年降水量分别只有 425.4mm 和 534.9mm,苜蓿草地土壤湿度再度下降。2003 年 4 月~2004 年 4 月期间南部旱塬 10~11 年生、15~16 年生和 23~24 年生苜蓿草地耗水量分别为 537.7mm、579.6mm 和 612.6mm,平均值为 576.6mm,比当地年降水量平均值 5411.8mm 高出 34.8mm,且表现出随苜蓿生长年限延长,苜蓿草地耗水量逐渐增加的趋势。

表 3 南部半湿润旱塬区不同生长年限苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度和土壤含水量年度变化

Table 3 Annual soil moistures and soil water amount changes in 0~1000cm soil layers of different growth age alfalfa grasslands on south highland plain of the Loess Plateau

草地类型 Grassland type	土壤湿度 Soil moisture (%)				土壤含水量 Soil water amount (mm)				土壤有效含水量 Available soil water amount (mm)			
	2003	2004	2005	平均 average	2003	2004	2005	平均 average	2003	2004	2005	平均 average
5~6 年生 5-6 years	11.00	10.53	10.77	10.77	1430.4	1369.3	1399.9	1399.9	260.4	199.3	229.9	229.9
10~12 年生 10-12 years	11.05	12.05	11.46	11.52	1436.3	1567.1	1489.7	1497.7	266.3	397.1	319.7	327.7
15~17 年生 15-17 years	10.66	11.35	10.65	10.89	1386.1	1475.0	1384.6	1415.2	216.1	305.0	214.6	245.2
23~25 年生 23-25 years	10.75	11.18	10.72	10.88	1397.4	1453.3	1393.0	1414.6	227.4	283.3	223.0	244.6

各年生苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度剖面特征年度变化特征基本类似(图 5~6),0~300cm 土层土壤湿度年际变化剧烈,而 300~1000cm 土层土壤湿度值十分接近,年际之间差异不大,表明南部旱塬 5~25 年生各类苜蓿草地降水影响深度为 300cm 左右,300cm 以下土层难以受到雨季降水的直接影响,土壤湿度长期保持基本稳定状态,在苜蓿草地生长期,其土壤干层属于长久性的,难以通过年度降水来减轻和消除。

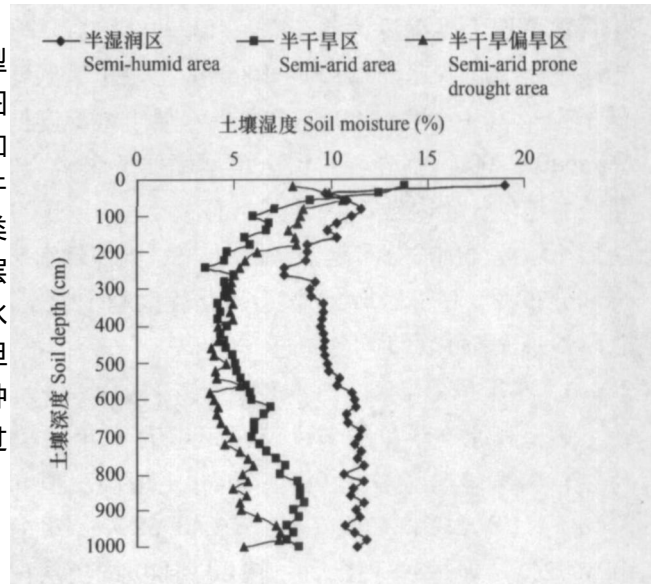


图 4 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig. 4 Comparison of soil moisture distribution on alfalfa grasslands in different dryland areas on the Loess Plateau



2.3.2 半干旱区

2005年4月6日及10月份固原7年生苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度平均值分别为8.62%、6.96%、61.19%和7.24%，土壤含水量分别为1120.2mm、904.2mm、804.7mm和940.6mm，4月份苜蓿草地土壤湿度最高，土壤含水量随着苜蓿快速生长吸水消耗逐渐下降，6月份较4月份0~1000cm土层土壤含水量减少216mm，到8月份苜蓿旺盛生长期土壤湿度降到最低点，土壤含水量较4月份减少315.5mm，10月份随着苜蓿生长减缓和雨季降水补充，苜蓿草地土壤湿度再次回升，达到本年度次高水平，土壤含水量较8月份增加135.9mm。2005年固原年降水量为275.0mm，属于严重干旱年型，苜蓿草地土壤干燥化程度继续加强，10月份和4月份相比，0~1000mm土层土壤含水量减少179.6mm。

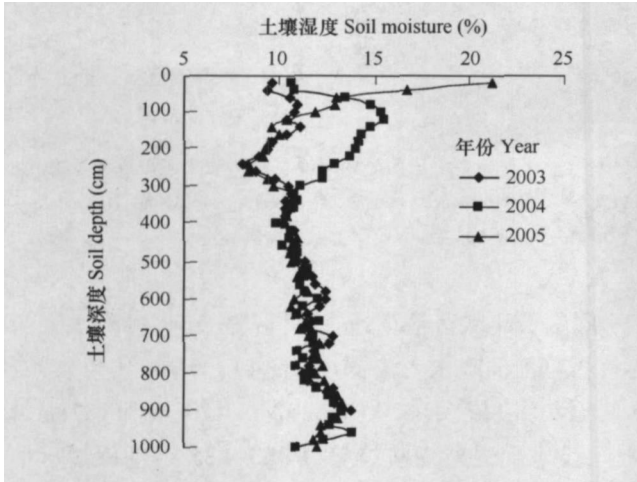


图5 黄土高原南部旱原10~12年生苜蓿草地土壤湿度剖面特征年度变化

Fig. 5 Annual changes of soil moisture distributions of the 10-12 years alfalfa grasslands on south highland plain of the Loess Plateau

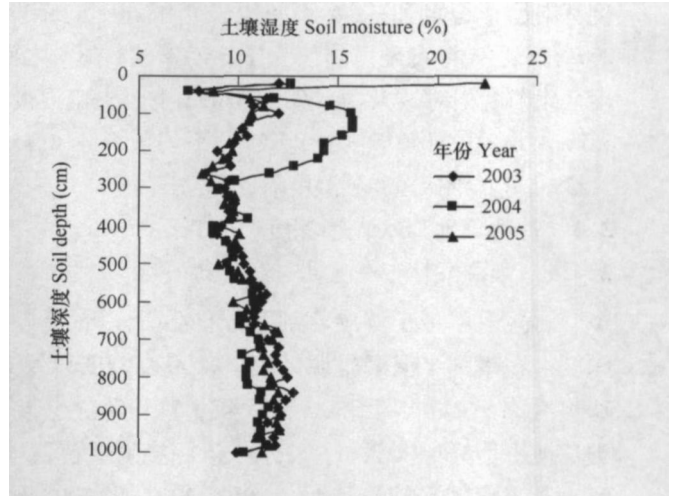


图6 黄土高原南部旱原23~25年生苜蓿草地土壤湿度剖面特征年度变化

Fig. 6 Annual changes of soil moisture distributions of the 23-25 years alfalfa grasslands on south highland plain of the Loess Plateau

7年生苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度剖面分布特征季节变化如图7所示，除4月份土壤湿度明显较高且波动较为剧烈外，6月、8月和10月等不同季节间变化相对平稳。6和8月份0~400cm土层土壤湿度基本接近，而8月份400~1000cm土层土壤湿度明显低于6月份，土壤湿度介于4.38%~7.56%之间，平均值仅为5.43%，在660~760cm土层土壤湿度低于凋萎湿度值，表明在干旱年型由于降水供应不足，苜蓿草地夏季旺盛生长期是以消耗400cm以下深层土壤水分作为代价的。和8月份相比，10月份苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度整体上升1%~3%，以0~400cm土层土壤湿度增加较为明显。

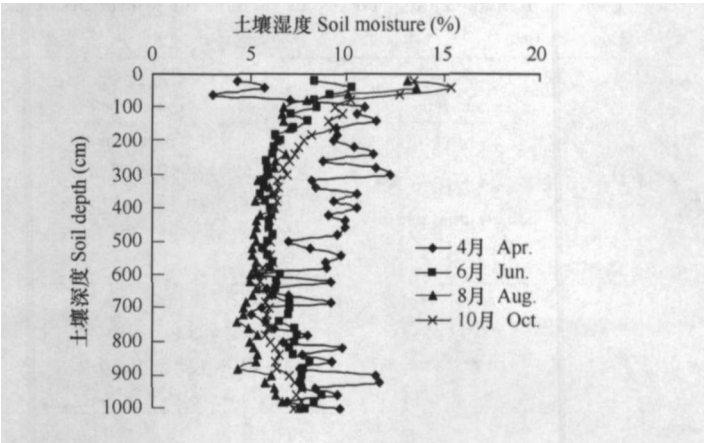


图7 黄土高原半干旱丘陵陵区固原7年生苜蓿草地土壤湿度剖面分布特征季节变化

Fig. 7 Seasonal soil moisture distribution changes of the 7 years alfalfa grassland at Guyuan of semiarid hilly region on the Loess Plateau

2003~2005年固原年降水量依次为551.6mm、347.0mm和275.0mm，分别属于丰水年型和连续严重干旱年型，半干旱区苜蓿草地呈现土壤干燥化程度加强趋势。3~4年生苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度平均值从2004年4月的10.41%降低到2005年10月的7.54%，2个生长年度土壤含水量共计减少372.8mm，平均每年多耗水186.4mm。

### 2.3.3 半干旱偏旱区

海原 2003~2005年降水量分别为 343.9mm、2501.6mm 和 130.6mm, 为连续严重干旱年型。图 8 为 2004 年测定的 7 年生苜蓿草地和 2005 年测定的 6 年生苜蓿草地土壤湿度比较。2005 年 6 年生苜蓿草地湿度稍高于 2004 年 7 年生草地, 在 140~400cm 土层范围内高出 111% 左右。从两个年度 6 种不同生长年限苜蓿草地土壤湿度剖面分布特征来看, 在半干旱偏旱区的海原 4 年生以后苜蓿草地湿度基本趋于稳定和一致, 不同生长年限和不同年度 0~200cm 土层土壤湿度平均值介于 61.7%~8.6% 之间, 年度变化幅度相对较大, 而 200~700cm 土层土壤湿度介于 3.9%~0% 之间且年度变化较小, 平均值介于 4.1%~41.5%, 基本维持在凋萎湿度附近。

### 2.4 苜蓿草地降水入渗深度

#### 2.4.1 半湿润区

通过对草地土壤湿度剖面分布特征分析, 可以推断出不同生长年限苜蓿草地在不同降水年型的降水入渗深度。在南部半湿润旱塬区镇原, 2002、2003 以及 2005 年苜蓿草地的降水入渗深度 (表 4)。5~6 年生、10~12 年生、15~17 年生和 23~25 年生苜蓿草地 3 年平均降水入渗深度依次为 200cm、207cm、173cm 和 187cm, 4 类草地平均为 191.7cm。降水入渗深度随着苜蓿生长年限延长呈现逐渐变浅趋势, 但 23~25 年生苜蓿草地降水入渗深度又稍有增加。2002、2003 和 2005 年不同降水年型各类苜蓿草地平均降水入渗深度分别为 153cm、265cm 和 145cm, 3 年平均为 188cm。在降水丰沛的 2003 年, 草地降水入渗深度高达 240~300cm, 在降水正常的 2002 和 2005 年则只有 150cm 左右。

表 4 黄土高原不同类型旱区不同降水年型苜蓿草地降水入渗深度 (cm)

Table 4 Rainfall infiltration depths of different growth age alfalfa grasslands in different rainfall years on different rainfall areas of the Loess Plateau

干旱类型区 Dry land type	草地类型 Grassland type	年份 Year				平均 Average
		2002	2003	2004	2005	
半湿润区 Semihumid area	5~6 年生 5-6 years	-	240	-	160	200
	10~12 年生 10-12 years	160	300	-	160	207
	15~17 年生 15-17 years	140	260	-	120	173
	23~25 年生 23-25 years	160	260	-	140	187
	平均 average	153	265	-	145	/
半干旱区 Semiarid area	2~4 年生 2-4 years	-	320	80	40	147
	5~7 年生 5-7 years	-	200	60	80	113
	8~10 年生 8-10 years	-	220	160	140	173
	平均 average	-	247	100	87	144
半干旱偏旱区 Semiarid drought prone area	3~4 年生 3-4 years	-	-	180	180	180
	6~7 年生 6-7 years	-	-	160	200	180
	10~11 年生 10-11 years	-	-	120	200	160
平均 average	-	-	153	193	173	

#### 2.4.2 半干旱区

在半干旱区固原, 2003、2004 和 2005 年各类苜蓿草地降水入渗深度平均值分别为 247cm、100cm 和 87cm, 随降水量减少苜蓿草地降水入渗深度呈现逐年变浅趋势 (表 4)。2~4 年生、5~7 年生和 8~10 年生苜蓿草地各年度平均降水入渗深度分别为 147cm、113cm 和 173cm。各年度各类苜蓿草地平均降水入渗深度为 144cm, 低于南部半湿润旱塬区的 187cm。

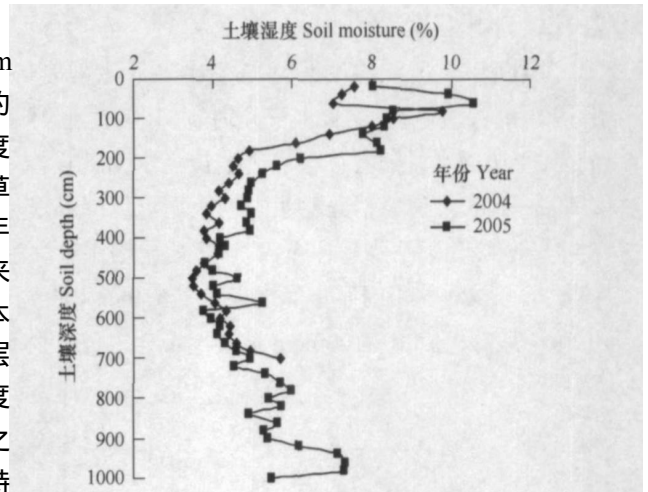


图 8 黄土高原半干旱偏旱区海原苜蓿草地土壤湿度年度变化

Fig. 8 Soil moisture changes of alfalfa grasslands at Haiyuan on semiarid prone drought area of the Loess Plateau

### 2.4.3 半干旱偏旱区

在半干旱偏旱区海原, 2004年 4年生、7年生和 11年生苜蓿草地降水入渗深度平均值为 153cm。2005年 3年生、6年生和 10年生苜蓿草地降水入渗深度平均值为 193cm(表 4)。2年平均降水入渗深度为 173cm。

### 2.5 苜蓿草地土壤干燥化强度评价

#### 2.5.1 半湿润区

在南部半湿润旱塬区, 3年生苜蓿草地 0~ 800cm、6年生、12年生、17年生和 25年生苜蓿草地 0~ 1000cm 土层平均土壤干燥化指数介于 24% ~ 67%之间, 平均值 36%(表 5)。3年生和 6年生苜蓿草地分别达到中度干燥化和强烈干燥化强度, 12年生、17年生和 25年生苜蓿草地均已达到严重干燥化强度, 且后者均已非常接近强烈干燥化强度。而荒草地土壤干燥化指数为 141%, 为无干燥化强度。若以土壤干燥化强度作为界定指标, 土壤干层是指土壤干燥化指数小于 100%的土层, 土壤干燥化指数小于 79%的土层为中度干燥层, 土壤干燥化指数小于 50%的土层为严重干燥层, 土壤干燥化指数小于 29%的土层为强烈干燥层, 土壤干燥化指数小于零的土层为极度干燥层。

表 5 黄土高原不同类型旱区苜蓿草地土壤干燥化指数、土壤干燥化强度和土壤干层厚度 (cm)

Table 5 SDI soil desiccation intensity and thicknesses of desiccated soil layers on alfalfa grasslands in different dryland regions of the Loess Plateau

干旱类型区 Dryland region	草地类型 Grassland type	平均土壤干燥化指数 Average SDI (%)	土壤干燥化强度 Soil desiccation intensity	极度干燥层 Extreme desiccated soil layers	强烈干燥层 Strong desiccated soil layers	严重干燥层 Serious desiccated soil layers	总土壤干层 Total desiccated soil layers
半湿润区 Semihumid area	3年生 3 years	67	中度干燥化 Medium desiccated	40	240	340	500
	6年生 6 years	24	强烈干燥化 Strong desiccated	120	460	980	980
	12年生 12 years	38	严重干燥化 Serious desiccated	40	380	760	960
	17年生 17 years	25	严重干燥化 Serious desiccated	100	400	980	980
	25年生 25 years	26	严重干燥化 Serious desiccated	80	540	980	980
	平均 Average	36	严重干燥化 Serious desiccated	76	404	808	880
	荒草地 Natural grassland	141	无干燥化 No desiccated	0	0	0	240
半干旱区 Semiarid area	4年生 4 years	36	严重干燥化 Serious desiccated	40	520	600	1000
	7年生 7 years	32	严重干燥化 Serious desiccated	0	580	840	940
	10年生 10 years	20	强烈干燥化 Strong desiccated	80	720	900	980
	平均 Average	29	严重干燥化 Serious desiccated	40	607	780	973
	荒草地 Natural grassland	92	轻度干燥化 Slight desiccated	0	60	200	360
半干旱偏旱区 Semiarid drought prone area	3年生 3 years	54	严重干燥化 Serious desiccated	200	440	580	740
	6年生 6 years	19	强烈干燥化 Strong desiccated	260	700	820	1000
	10年生 10 years	21	强烈干燥化 Strong desiccated	400	600	720	1000
	平均 Average	31	严重干燥化 Serious desiccated	287	580	706	913
	荒草地 Natural grassland	81	轻度干燥化 Slight desiccated	140	260	260	580

在 3~25年生苜蓿草地 0~1000cm 土层中, 极度干燥层分布深度依次为 140~180cm, 160~300cm, 220~260cm, 200~300cm, 220~300cm, 强烈干燥化强度以上的土壤干层分布深度分别为 80~320cm, 100~560cm, 100~480cm, 120~520cm, 100~640cm, 严重干燥化强度以上的土壤干层分布深度分别为 40~380cm, 20~1000cm, 80~800(960~1000)cm, 20~1000cm, 20~1000cm, 中度干燥层属于过渡性土壤干层, 只存在于 3年生和 12年生苜蓿草地中, 且土层深度较薄。在 3年生苜蓿草地中, 540cm 以下土层为无干燥层。3~25年生苜蓿草地中极度干燥层、强烈干燥层和严重干燥层厚度平均值依次为 76cm, 404cm 和 808cm, 各年生苜蓿草地轻度干燥化强度以上土壤干层厚度依次为 500cm, 980cm, 960cm, 980cm 和 980cm, 平均值为 880cm。

### 2.5.2 半干旱区

固原 4年生、7年生和 10年生苜蓿草地和荒草地 0~1000cm 土层平均土壤干燥化系数分别为 36%、32%、20%和 92%, 4年生和 7年生草地达到严重干燥化强度, 10年生草地达到强烈干燥化强度, 而荒草地只达到轻度干燥化(表 5)。4年生苜蓿草地 0~160cm 主要为轻度干燥层至中度干燥层, 160~700cm 主要为强烈干燥层, 700~1000cm 主要为中度和严重干燥层。7年生苜蓿草地 0~60cm 为无干燥层, 60~80cm 为轻度干燥层, 80~160cm 为中度干燥层, 160~300cm 为严重干燥层, 300~880cm 为强烈干燥层, 880~1000cm 为严重干燥层。10年生苜蓿草地 0~20cm 为无干燥层, 20~60cm 为轻度干燥层, 60~220cm 为严重干燥层, 220~940cm 为强烈干燥层, 中间夹有极度干燥层, 940~1000cm 为严重干燥层。4年生、7年生和 10年生草地强烈干燥化土层厚度依次为 520cm, 580cm 和 720cm, 轻度干燥化强度以上土壤干层厚度分别为 1000cm, 940cm 和 980cm。

### 2.5.3 半干旱偏旱区

海原 3年生、6年生和 10年生苜蓿草地以及荒草地 0~1000cm 土层的土壤干燥化系数分别为 54%、19%、21%和 81%, 分别属于中度干燥化、强烈干燥化、强烈干燥化和轻度干燥化强度(表 5)。3年生苜蓿草地 0~80cm 土层主要为中度干燥层, 80~700cm 主要为严重干燥层, 其中 100~540cm 为强烈干燥层, 200~280cm 和 320~440cm 土层属于极度干燥层, 700~760cm 为轻度干燥层, 760~1000cm 土层为无干燥层。6年生苜蓿草地 0~180cm 主要为中度干燥层, 180~1000cm 土层为严重干燥层, 其中 200~900cm 为强烈干燥层, 380~660cm 为极度干燥层。10年生苜蓿草地 0~180cm 主要为中度干燥层, 180~900cm 土层为严重干燥层, 其中 200~800cm 土层为强烈干燥层, 320~720cm 土层为极度干燥层, 920~1000cm 为轻度干燥层。荒草地 40~360cm 土层为严重干燥层, 其中 40~300cm 为强烈干燥层, 360~580cm 为轻度干燥层, 580~960cm 为无干燥层, 960~1000cm 为中度和轻度干燥层。在 3年生、6年生和 10年生苜蓿草地以及荒草地上, 轻度以上土壤干层厚度分别为 760, 1000, 1000cm 和 580cm。

### 2.5.4 不同类型干旱区比较

半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区 3个典型苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤干燥化指数分别为 19%、21%和 19%, 均属于强烈干燥化强度, 中度干燥化强度以上的土壤干层厚度 940~980cm 以上。而半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区不同生长年限苜蓿草地土壤干燥化强度平均值分别为 36%、29%和 31%, 均为严重干燥化强度, 土壤干层厚度分别为 880, 973cm 和 913cm。这表明, 虽然黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地土壤湿度和含水量值有明显差异, 但其土壤干燥化强度十分相似。

## 2.6 苜蓿草地土壤干层消除所需时间

### 2.6.1 半湿润区

多年生苜蓿草地所形成的深厚土壤干层, 需要通过草地翻耕休闲或与粮食作物轮作破除苜蓿连续高强度耗水效应, 促使苜蓿草地土壤干层的土壤湿度逐步恢复。在南部半湿润旱塬区镇原, 8年生苜蓿草地翻耕后轮作 3a 粮食作物, 0~700cm 土层土壤湿度平均值达到 17.18%, 0~440cm 土层土壤湿度达到 15.9% 以上, 土壤湿度基本得到完全恢复, 440~700cm 土层也达到 12%~13% 之间, 土壤湿度得到部分程度恢复。和同期测定的 11年生苜蓿草地平均含水量 10.77% 相比, 0~700cm 土层贮水量增加 583.31mm, 每年平均增加土壤贮水量 194.4mm。12年生苜蓿草地轮作 15a 粮食作物后, 0~700cm 土层土壤平均湿度达到 20.89%, 苜蓿草地

所形成的土壤干层已经完全消除,土壤湿度恢复到相对较高的水平(图9)。

若以镇原5~25年生苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度平均值10.84%和总贮水量1409.1mm计算,苜蓿草地欲恢复到土壤稳定湿度值15.5%和总贮水量2015.0mm,需要增加土壤贮水量605.8mm。1957~2001年镇原降水量介于283.8~821.9mm,45a降水量平均值为541.8mm,1996~2005年降水量平均值仅为511.0mm。若丰水年型、平水年型和干旱年型降水量平均值分别按照600、540mm和480mm计算,粮草轮作期间当地大田粮食作物生长一季耗水量400mm,则可供苜蓿草地土壤湿度恢复的降水量分别为200、140mm和80mm。在连续丰水年型、连续平水年型和连续干旱型,旱塬苜蓿草地土壤湿度恢复到土壤湿度值15.5%的水平,分别需要3.03、4.33a和7.57a。若恢复到旱塬撂荒草地土壤湿度18.1%和贮水量2359.7mm水平,则需要增加土壤贮水量950.6mm,分别需要4.57、6.179a和11.88a。若以1957~2001年丰水年、平水年型和干旱年型在当地实际出现概率分别占28.8%、32.1%和38.9%计算,则恢复到土壤稳定湿度值和撂荒草地湿度值分别需要5.20a和8.20a,即分别需要6a和9a以上(表6)。

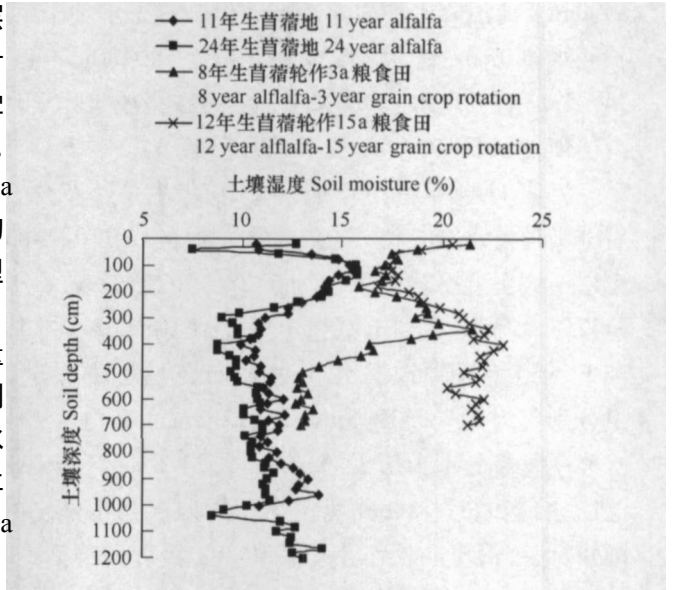


图9 黄土高原南部半湿润旱塬区苜蓿草地实行粮草轮作后土壤湿度恢复情况

Fig. 9 Soil moisture restoration of alfalfa grasslands after alfalfa-grain crop rotations on south semihumid highland plain of the Loess Plateau

表6 黄土高原苜蓿草地土壤湿度恢复所需水量和时间

Table 6 Comparison of water amount and time required for soil water recovery on an alfalfa grassland of the loess plateau

干旱类型区 Dry land region	苜蓿草地湿度(%) Soil moisture of Alfalfa grassland		土壤稳定湿度(%) Stable soil moisture		总需水量 Total Water amount required (mm)	每年土壤湿度恢复需水量 Annual water amount required for soil water recovery(mm)			土壤湿度恢复所需年数 Years required for soil water recovery(a)
	土壤 湿度值 Moisture Value (%)	土壤 含水量 Water amount (mm)	土壤 湿度值 Moisture Value (%)	土壤 含水量 Water amount (mm)		丰水年 Rich rain fall year	平水年 Normal rain fall year	干旱年 Drought year	
半湿润区 Semihumid area	10.84	1409.1	15.50	2015.0	606.8	200	140	80	5.20
半干旱区 Semiarid area	7.07	919.1	12.00	1560.0	640.9	150	90	30	10.72
半干旱偏旱区 Semiarid drought prone area	5.45	708.5	10.75	1397.5	689.0	140	80	20	17.49

### 2.6.2 半干旱区

同理,在半干旱区固原,以苜蓿草地土壤湿度7.07%和土壤含水量919.1mm为基础,恢复到土壤稳定湿度值12%的水平,需要增加土壤贮水量640.9mm。固原45a降水量455.4mm。在丰水、平水和干旱年型,年降水量分别为500、440mm和380mm,作物一季耗水量350mm,粮草轮作时每年土壤湿度恢复量分别为150、90mm和30mm,则苜蓿草地土壤湿度恢复分别需要4.27、7.12a和21.36a。若丰水、平水和干旱年型发生概率为40.0%、26.7%和33.3%,则固原苜蓿草地土壤干层恢复需要10.72a,即11a以上(表6)。

### 2.6.3 半干旱偏旱丘

类似于半湿润区和半干旱区,半干旱偏旱区海原6类苜蓿草地土壤湿度5.43%,土壤湿度恢复需水量689mm。海原降水量386.1mm,在丰水、平水和干旱年型,年降水量分别为440、380mm和320mm,一季作物生长耗水300mm,则土壤湿度恢复量为140.80mm和20mm,苜蓿草地土壤湿度恢复分别需时4.92、8.61a和34.45a。若以丰水、平水和干旱年型在当地实际出现概率29.5%、31.8%和38.6%计算,海原苜蓿草地土壤干层恢复需要17.49a即18a以上(表6)。

海原11年生苜蓿草地以及10年生苜蓿草地开垦后分别种植4、10a和18a粮食作物后的农田0~660cm土层土壤湿度平均值依次为5.28%、5.53%、6.84%和9.32%,均尚未达到土壤稳定湿度值10.75%(图10),和11年生苜蓿草地相比,0~660cm土层土壤水分恢复量分别仅为21.3、112.3mm和212.5mm,平均每年土壤水分恢复量分别为5.3、11.2mm和11.8mm。若以土壤湿度达到和超过8%作为土壤干层湿度初步恢复的界限指标,苜蓿草地轮作4、10a和18a粮食作物后,土壤干层湿度初步恢复深度分别为120、180cm和260cm,而其下深层土壤湿度平均值仅为4.30%、4.87%和8.13%,表明轮作4a和10a粮食作物后深层土壤湿度仍然与苜蓿草地相当,轮作18年以后也只有土壤稳定湿度值的75.6%,仍然处于干燥化状态。可见,地处半干旱偏旱地区的海原苜蓿草地发生土壤干燥化后,通过粮草轮作方式恢复深层土壤干层湿度十分困难,需要的时间也相当漫长。

### 3 小结

在黄土高原半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区等不同干旱类型区,不同生长年限的苜蓿草地均发生了严重的土壤干燥化现象。

(1)在南部半湿润旱塬区,5~25年生苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度平均值为10.84%,土壤含水量为1409.1mm,土壤干燥化强度达到严重干燥化和强烈干燥化强度,土壤干层厚度超过960cm,而3年生苜蓿草地只达到中度干燥化强度,土壤干层厚度为500cm,3~25年生苜蓿草地土壤水分过耗量平均值为5401.2mm,平均土壤干燥化速度为61.2mm/a,各类苜蓿草地年降水入渗深度平均值为187.8cm,降水影响深度只有300cm左右,300cm以下深层土壤湿度基本保持稳定状态,不随年度降水和苜蓿生长年限而发生变化,采用过粮草轮作方式使苜蓿草地土壤湿度恢复到当地土壤稳定湿度15.5%需要6a以上。

(2)在中部半干旱丘陵沟壑区,4~10年生苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度平均值为7.07%,土壤含水量为919.1mm,土壤干燥化强度达到严重干燥化和强烈干燥化强度,且随生长年限延长而加剧,土壤干层厚度超过940cm,4~10年生苜蓿草地土壤水分过耗量平均值为640.1mm,平均土壤干燥化速度为1011.9mm/a,各类苜蓿草地年降水入渗深度平均值为144cm,苜蓿草地土壤湿度恢复到当地土壤湿度值12%需要11a以上。

(3)在北部半干旱偏旱区,3~11年生苜蓿草地0~1000cm土层土壤湿度平均值为5.43%,土壤含水量为708.5mm,土壤干燥化强度达到强烈干燥化强度,土壤干层厚度超过1000cm,3年生苜蓿草地只达到中度干燥化强度,土壤干层厚度为760cm,3~10年生苜蓿草地土壤水分过耗量平均值为455.0mm,平均土壤干燥化速度为99.0mm/a,各类苜蓿草地年降水入渗深度平均值为173cm,苜蓿草地土壤湿度恢复到当地土壤湿度

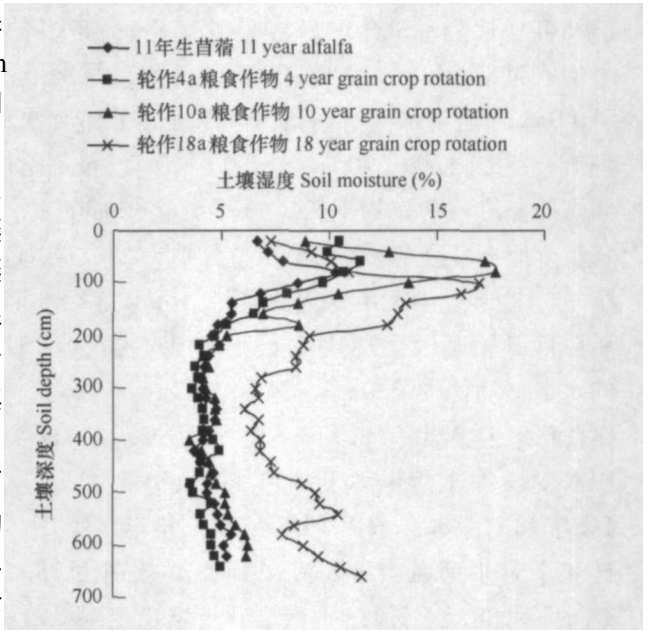


图10 黄土高原半干旱偏旱区海原苜蓿草地轮作粮食作物后土壤湿度恢复状况

Fig. 10 Soil moisture restorations of alfalfa grasslands at H. aiyuan on semiarid prone drought area of the Loess Plateau

湿度值 10 79% 需要 18a 以上。

(4) 不同干旱类型区 5~6 年生苜蓿草地土壤湿度和含水量值有明显差异, 半湿润区高于半干旱区和半干旱偏旱区, 但其土壤干燥化速度比较接近, 土壤干燥化强度十分相似, 中度干燥化强度以上的土壤干层厚度达到 940~980cm 以上, 随着降水量从半湿润区向半干旱偏旱区趋势性减少, 苜蓿草地土壤湿度恢复难度趋于增加。

## References

- [ 1 ] Li Y S. Characters of soil water cycling and its influences on land water cycling of the loess region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 92—101.
- [ 2 ] Han S F. Characters of soil water utilization of alfalfa grassland on mountainous area of south Ningxia. *Pratacultural Science*, 1990, 7(5): 47—53.
- [ 3 ] Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effect on water ecoenvironment. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 404—411.
- [ 4 ] Fan J, Hao M D, Shao M A. Deep soil water consumption and water ecoenvironment on dryland agroecosystem of the Loess Plateau. *Transaction of the CSAE*, 2004, 20(1): 61—65.
- [ 5 ] Zhang C X, Hao M D, Wei X R, et al. Soilwater distribution characteristics of alfalfa with different planting years in the gully region of Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6): 604—607.
- [ 6 ] Zhao Y Y, Liu W Z, Pu L J. Effects of alfalfa growth on soil water environment in hillgully area of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(1): 85—91.
- [ 7 ] Cheng J M, Wan H E, Wang J. Alfalfa growth and its relation with soilwater status in loess hilly and gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 435—438.
- [ 8 ] Yang W Z, Shao M A. Research on soilwater of the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000.
- [ 9 ] Li Y S. Effects of forest on water cycle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427—432.
- [ 10 ] Yang W Z. Soilwater resources and afforestation in Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433—438.
- [ 11 ] Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 1—6.
- [ 12 ] Chen H S, Wang K L, Shao M A. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4): 155—161.
- [ 13 ] Chen H S, Shao M A. Standards for assessing Desiccation of deep soil layer on Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 164—166.

## 参考文献:

- [ 1 ] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 3(2): 91~101.
- [ 2 ] 韩仕峰. 宁南山区苜蓿草地土壤水分利用特征. *草业科学*, 1990, 7(5): 47~53.
- [ 3 ] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. *土壤学报*, 2002, 39(3): 404~411.
- [ 4 ] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土高原沟壑区草地深层土壤干燥化与氮素消耗. *自然资源学报*, 2004, 19(2): 201~206.
- [ 5 ] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 等. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤水分剖面特征研究. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 604~607.
- [ 6 ] 赵姚阳, 刘文兆, 濮励杰. 黄土丘陵沟壑区苜蓿地土壤水分环境效应. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 85~91.
- [ 7 ] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 435~438.
- [ 8 ] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000.
- [ 9 ] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 433~438.
- [ 10 ] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 427~432.
- [ 11 ] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源. *土壤学报*, 2004, 41(1): 1~6.
- [ 12 ] 陈洪松, 王克林, 邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展. *林业科学*, 2005, 41(4): 155~161.
- [ 13 ] 陈洪松, 邵明安. 黄土区深层土壤干燥化程度的评价标准. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 164~166.