

# 黄土高原人工草地的土壤水分动态 及水土保持效益研究

卢宗凡 张兴昌<sup>①</sup> 苏敏 林和平

中国科学院  
西北水土保持研究所, 陕西场陵, 712100)  
水利部

## 提 要

通过9年观测,黄土高原人工草地土壤水分的季节性变化可划分为三个阶段,在此基础上模拟不同人工草地土壤水分的变化规律;随着牧草生育期的延长至第9年,人工草地土壤水分恢复程度逐渐减弱;沙打旺生存能力极强,能够高效地利用深层土壤贮水;用数学模型可以模拟不同人工草地的水土流失,将植被因子引入水土流失方程,可以定量描述对水土流失的影响;反映植被、土壤等因子与水土流失关系的复合因子 $A^1$ 值,基本上代表不同人工草地水土流失状况。

**关键词:**人工草地土壤水分动态 水分补偿 水土保持效益

陕北黄土高原地区处于半湿润向半干旱气候过渡的地带,30多年平均降水量为483.4mm~630.8mm,60%以上集中在7~9月,多暴雨。该地区植被稀疏,人工草地和天然草地复盖率仅为27.94%,多零散分布在25°以上的坡地上。所以水土流失严重,土壤侵蚀模数高达14000t/Km<sup>2</sup>·a,该地区的水土流失和土壤干旱限制了农业生产和草地建设以及畜牧业的发展。由于本区绝大部分人工草地依赖于自然降水,>25°的坡地又有水土流失的威胁。所以研究人工草地土壤水分变化规律及水土流失状况,对于了解人工草地水分生产潜力和水土保持效益具有实际意义,可为陕北黄土高原地区人工草地的建设提供依据。

## 1 试验区与研究方法

试验地设在陕西省安塞县沿河湾茶坊自然村的山坡耕地上,该地区处于杏子河中下游,多年平均降水量为549.1mm。试验区坡度32°,坡向东南,实验分为4个项目,分别为草木栖、紫花苜蓿、沙打旺、红豆草的人工草地,另设裸地对照区,试验从1983年至1992年共连续9年。9年内,1983、1985及1988年为丰水年,年降水量依次为701.0mm、666.8mm和729.2mm;1986和1987年为欠水年,年降水量依次为351.3mm和404.8mm;1984、1989、1990及1991年为平水年,年降水量依次为503.7mm、543.0mm、563.6mm和588.2mm。因

<sup>①</sup> \* 本文为张兴昌同志执笔

此,综合9年试验资料便能基本反映该地区人工草地土壤水分动态及水保效益。

每一试验小区下方,布设水泥径流池1个,容积为 $2\text{m}\times 2\text{m}\times 1.5\text{m}$ 。

各种牧草均按生育期测定产草量,并进行烘干称重。

1983年和1984年按月测试验小区的土壤水分,深度2m,分20层,每层10cm,重复2次;1985~1991年,在雨季前后,土壤封冻及解冻4个时期分别测土壤水分,深度4m,2m以上分20层,每层10cm,2m以下分10层,每层20cm,均重复2次。土壤含水量测定采用 $105^{\circ}\text{C}$ 烘干法。

产流后测定径流量、侵蚀量及降雨量、降雨强度。并配合测定地上植被复盖度。

## 2 人工草地土壤水分变化规律

自然降水是人工草地土壤水分的主要来源,土壤水分含量受当地气候降水和牧草生育特性的双重影响。了解和认识人工草地土壤水分年际动态,年内变化以及牧草生育期耗水特征,才能不失时机地采用相应的保水技术措施,保证人工草地高产对水分的需求,提高降水资源的利用率。

### 2.1 土壤水分的季节性变化

李德广等人利用谐波分析方法研究了山西平川旱地土壤水分动态规律,揭示了旱地土壤水分阶段性特征。人工草地土壤水分动态与平川旱地不同,它反映了当地气候特征和人工草地耗水特征。根据人工草地季节性变化趋势,采用一元四次回归曲线模型 $y=b_0+b_1t+b_2t^2+b_3t^3+b_4t^4$ 进行拟合,能很好地反映土壤水分季节性变化规律。

因本试验所选用的草种均为多年生牧草,第一年草地生产力较低,对水分的消耗也较少,故采用第二年土壤水分资料进行分析。

1984年紫花苜蓿地土壤水分动态方程

$$y=394.2-0.789t+(9.963E-03)t^2-(3.943E-05)t^3+(4.473E-08)t^4$$

$$R=0.7832 \quad F=6.777 \quad n=12$$

1984年对照裸地土壤水分动态方程

$$y=405.4+0.077t+(4.199E-03)t^2-(3.009E-05)t^3+(4.853E-08)t^4$$

$$R=0.9168 \quad F=9.228 \quad n=12$$

以上两式中 $y$ 为2m土层贮水量,单位mm; $t$ 为4月1日开始向后持续时间,单位d(天)。

经显著性检验 $r_{0.01}=0.7079$ , $F_{0.01}=6.55$ ,故该两方程均达到极显著标准,表明方程回归良好。

根据对陕北人工草地土壤水分季节性变化(图1)研究得出,人工草地土壤水分季节性变化大致分为三个时期。

春季失墒期:时间4月初~6月上旬,此时人工牧草生育期一般为拔节期至现蕾开花期。地面温度逐渐回升,人工牧草生长旺盛,耗水量不断增加。与此同时,春旱时有发生,降水补给量较少。土壤水分处于消耗阶段。紫花苜蓿2m土层贮水量由394.2mm降至374.9mm,失墒19.3mm,日均失墒0.32mm;但是裸地2m土层贮水量变化与人工草地形成明显的对照,土壤贮水量由405.4mm增至419.3mm,增墒13.9mm,日均增墒0.23mm。表明,紫花苜蓿草地春季蒸腾耗水是土壤失墒的主要途径。

夏秋增墒期:时间6月中旬~9月下旬,牧草生育期一般为盛花期,正是刈割期。降水量

增大,约占年降水量60%以上,人工草地2m土层降水补给量明显大于蒸散量,土壤水分处于增加阶段。紫花苜蓿2m土层贮水量由374.9mm,增加到392.4mm,增墒17.5mm,日均增墒0.16mm;裸地2m土层贮水量由419.3mm,增加到432.7mm,增加13.4mm,日均增墒0.12mm,略低于紫花苜蓿,这可能是由于该季节暴雨较多,在降雨相同的情况下,裸地径流系数较大,土壤接受有效降水较少的缘故。

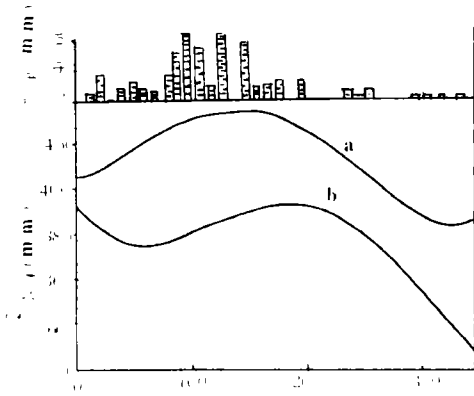


图1 人工草地土壤水分季节性变化规律  
注:a为裸地,b为紫花苜蓿

Fig.1 Dynamic change of soil water in a year in different grassland

秋末冬季缓慢失墒期:时间9月下旬至翌年3月下旬。人工牧草日益衰败,经过越冬期,耗水量减少,降水补给量也急剧减少,土壤表面蒸发成为土壤失墒的重要途径。紫花苜蓿地2m土层贮水量由392.4mm,降至323.7mm,失墒68.7mm,日均失墒0.38mm;裸地贮水量由432.7mm降至385.2mm,失墒47.5mm,日均失墒0.26mm。此阶段2m土层失墒量和日均失墒量比前两阶段均大。因此,控制该阶段土壤水分无效消耗,提高后茬土壤水分含量就显得十分必要。

2.2 不同人工草地土壤水分的差异

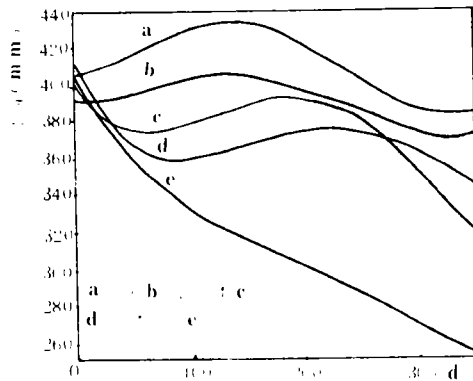


图2 不同人工草地2m土层水分季节性动态

Fig.2 Dynamic change of 2m layer in different grassland

不同的人工草地由于所处的生育期和耗水量不相同,土壤水分的季节性变化有所差异。其动态方程参数如表1,曲线图如图2。同一地点,在土壤、气候与耕作条件相同的情况下,从图2可以看出:草木栖贮水量季节性动态与紫花苜蓿略同。由于沙打旺生活力较强,比一般牧草耗水量大,可获得较高的产量,使水资源得到充分利用,土壤水分曲线在整个生长季节

中处于下滑阶段,至刈割期,2m 土层水分贮存量仅为 310.8mm,剩余有效水量为 197.7mm,到翌年 3 月份达到最低值,仅为 257.1mm,剩余有效水贮量为 144.0mm。1984 年红豆草生物鲜重为 179.4g/m<sup>2</sup>,远低于其它牧草,因而生育期内红豆草蒸腾耗水较小,土壤水分贮存量呈上升趋势。

比较不同人工草地 2m 土层贮水量季节性动态变化,可以明显看出,从返青期至刈割期,不同人工草地 2m 土层贮水量大小趋势为红豆草>紫花苜蓿>草木栖>沙打旺。如果和裸地相比较,均低于裸地土壤水分贮存量。

表 1 人工草地土壤水分季节性动态拟合方程

Tab.1 Imitation equation of soil water dynamic change

| 人工牧草  | y=b <sub>0</sub> +b <sub>1</sub> t+b <sub>2</sub> t <sup>2</sup> +b <sub>3</sub> t <sup>3</sup> +b <sub>4</sub> t <sup>4</sup> 回归系数取值 |                |                |                |                | 方程显著性检验 |        |
|-------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|--------|
|       | b <sub>0</sub>  | b <sub>1</sub> | b <sub>2</sub> | b <sub>3</sub> | b <sub>4</sub> | F 值     | R 值    |
| 草 木 栖 | 410.3   | -1.414         | 1.313E-02      | -4.433E-05     | 4.823E-08      | 3.514   | 0.8181 |
| 沙 打 旺 | 397.8   | -1.103         | 6.1756E-03     | -1.961E-05     | 2.196E-08      | 17.053  | 0.9523 |
| 红 豆 草 | 389.9   | 6.559E-02      | 2.173E-03      | -1.746E-05     | 2.943E-08      | 4.457   | 0.847  |

注\*: 方程回归 n=12, R<sub>0.01</sub>=0.7079, F<sub>0.01</sub>=6.55, 方程回归显著。

### 2.3 不同年份人工草地土壤水分动态

在不同年份的气候条件下,由于年降水量不相同,人工草地土壤水分的周年变化也有明显差异。

在生长期限的 9 年内(图 3),人工草地土壤水分得到两次较大的增长。1985 年,紫花苜蓿和沙打旺 2m 贮水量在雨季后达到 464.2mm 和 379.2mm,比雨季前 276.2mm 和 201.8mm 增加了 188.0mm 和 177.4mm,贮水量增加率为 68.1% 和 87.9%;1988 年,紫花苜蓿、沙打旺 2m 贮水量增加到 400.6mm 和 310.8mm,较雨前 294.3mm 和 268.3mm 有较大的提高,但低于 1985 年水平。此外 9 年间,人工草地土壤水分也有 3 次较大的失墒。1984 年、1986 年和 1989 年,紫花苜蓿 2m 土层贮水量年间达到最低点,依次为 363.5mm、286.1mm 和 217.3mm;沙打旺 2m 土层贮水量也达到最低点,依次为 223.9mm、180.9mm 和 181.2mm。土壤水分贮量随着生长年限的增加均成下降趋势,到 7—9 年,其取值基本接近一致,2m 土层贮水量在 180~250mm 内波动。

总之,紫花苜蓿在生长期限 9 年内,2m 土层贮水量明显高于沙打旺,并随着生长年限的增加到 7—9 年,其取值趋近一致。紫花苜蓿与沙打旺 2m 土层贮水量差值及变幅在逐年缩小。说明了在生长前 6 年内,沙打旺对土壤水分消耗明显高于紫花苜蓿。自 7—9 年人工草地开始衰退天然草类逐渐侵入,生长繁茂,沙打旺、紫花苜蓿 2m 土层土壤水分基本得不到增长。

### 2.4 不同年份人工草地底土层水分对表土层的补偿作用

从分析人工草地土壤水分年内动态变化规律得出,春季和秋末冬季均处于失墒期,草地蒸散失墒主要是靠底层水分对表层的输送补给作用。不同人工草地由于蒸腾和根系在土壤深层分布不同,其不同层次失墒量截然不同(表 2)。表现在 3 年生人工草地主要利用 50—200cm 以内土层水分,8 年生人工草地主要利用 150~400cm 土层水分。从利用深层水分能力的趋势来看,沙打旺优于其它人工草地,红豆草最弱。这基本上反映了不同人工草地地上

部生长状况和地下部根系分布的特征。

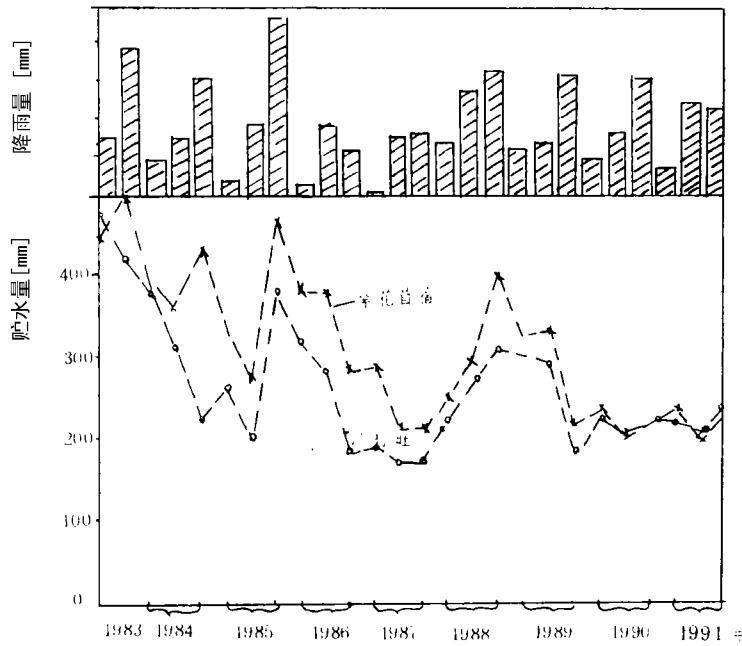


图3 不同降水年份人工草地土壤水分动态

Fig. 3 Dynamic change of grassland moisture in different year

表2 人工草地底层水分对表层的补偿作用

Tab. 2 Soil moisture restoring form bottom layer to top layer

| 土层深度<br>(cm) | 草木栖             |                  |                | 紫花苜蓿     |           |                | 沙打旺      |           |                | 红豆草      |           |                |
|--------------|-----------------|------------------|----------------|----------|-----------|----------------|----------|-----------|----------------|----------|-----------|----------------|
|              | 85年<br>4月<br>1日 | 85年<br>7月<br>16日 | 土壤<br>水分<br>增减 | 4月<br>1日 | 7月<br>16日 | 土壤<br>水分<br>增减 | 4月<br>1日 | 7月<br>16日 | 土壤<br>水分<br>增减 | 4月<br>1日 | 7月<br>16日 | 土壤<br>水分<br>增减 |
| 0—50cm       | 77.2            | 71.5             | 5.7            | 72.5     | 57.1      | 15.4           | 60.5     | 56.3      | 4.2            | 82.9     | 74.2      | 8.7            |
| 50—100cm     | 91.9            | 85.7             | 6.1            | 85.0     | 70.1      | 14.9           | 64.7     | 44.5      | 20.2           | 90.9     | 66.1      | 16.7           |
| 100—150cm    | 91.6            | 91.3             | 0.3            | 90.6     | 68.0      | 22.6           | 67.1     | 49.6      | 17.5           | 97.3     | 80.9      | 16.4           |
| 150—200cm    | 94.9            | 91.2             | 3.7            | 92.5     | 81.1      | 11.4           | 68.0     | 51.4      | 16.8           | 101.7    | 85.4      | 16.3           |
| 200—300cm    | 202.6           | 191.6            | 11.0           | 207.6    | 184.0     | 23.6           | 154.8    | 116.2     | 38.6           | 217.6    | 183.4     | 34.2           |
| 300—400cm    | 173.6           | 172.4            | 1.2            | 172.4    | 171.0     | 1.4            | 158.4    | 93.4      | 85.0           | 194.8    | 163.8     | 31.0           |
|              | 90年<br>4月<br>1日 | 90年<br>7月<br>16日 | 土壤<br>水分<br>增减 | 4月<br>1日 | 7月<br>16日 | 土壤<br>水分<br>增减 | 4月<br>1日 | 7月<br>16日 | 土壤<br>水分<br>增减 | 4月<br>1日 | 7月<br>16日 | 土壤<br>水分<br>增减 |
| 0—50cm       | 92.0            | 75.0             | 17.0           | 77.7     | 75.7      | 2.0            | 78.0     | 68.4      | 9.6            | 76.0     | 72.6      | 3.4            |
| 50—100cm     | 87.6            | 77.2             | 10.4           | 55.7     | 43.4      | 12.3           | 50.8     | 44.2      | 6.4            | 68.9     | 49.8      | 19.1           |
| 100—150cm    | 88.1            | 84.1             | 4.0            | 52.0     | 43.4      | 8.6            | 50.5     | 48.3      | 2.2            | 65.3     | 52.3      | 13.0           |
| 150—200cm    | 95.0            | 87.2             | 7.8            | 52.4     | 44.0      | 8.4            | 48.8     | 47.9      | 0.9            | 68.4     | 58.7      | 9.7            |
| 200—300cm    | 177.7           | 171.1            | 0.6            | 120.5    | 100.9     | 19.6           | 100.4    | 100.0     | 0.4            | 138.7    | 125.9     | 12.8           |
| 300—400cm    | 158.0           | 141.9            | 16.1           | 105.2    | 90.1      | 15.1           | 98.2     | 93.1      | 5.1            | 150.4    | 133.0     | 17.0           |

## 2.5 夏秋降水对人工草地水分的补偿作用

陕北黄土高原地区的草地,自然降水是草地土壤水分的唯一来源。由于雨季降水的补偿

作用,从而使草地土壤水分得以补充。但由于不同人工草地降雨入渗能力不同,其降水补给量也不相同。

利用直线回归  $W=a+bR$  分析计算夏秋降水对不同人工草地土壤水分的补偿作用得以下方程:

|        |                       |
|--------|-----------------------|
| 草木栖地:  | $W=150.4+0.635R$      |
|        | $r=0.818^* \quad n=9$ |
| 紫花苜蓿地: | $W=120.2+0.714R$      |
|        | $r=0.812^* \quad n=9$ |
| 沙打旺地:  | $W=69.4+0.625R$       |
|        | $r=0.771^* \quad n=9$ |
| 红豆草地:  | $W=145.5+0.670R$      |
|        | $r=0.735^* \quad n=9$ |
| 裸地:    | $W=226.7+0.545R$      |
|        | $r=0.743^* \quad n=9$ |

上式中  $W$  为牧草停止生长时 2m 土层贮水量(mm),  $R$  为夏秋降水量(mm)。方程经检验  $r_{0.05}=0.664$ , 均达到显著水平。

上式方程表明:夏秋降水对人工牧草停止生长时 2m 土层水分的补偿很显著的, 2m 土层贮水量随着夏秋降水量的增加而增加。回归系数  $a$  代表了不同人工草地对降水蓄积能力及牧草本身的耗水强度, 回归系数  $b$  的物理意义系指降水补给 2m 土层贮水量强度。从回归系数取值大小来看, 夏秋降水对草木栖和红豆草 2m 土层的补偿量明显高于紫花苜蓿和沙打旺, 以沙打旺补偿能力最低。但如和裸地进行对比, 夏秋降水对不同人工草地 2m 土层补给量都显著低于裸地。

## 2.6 不同年份的降水量对人工草地生产力的影响

土壤水分是影响和限制草地生产力的重要因子, 不同降水年份, 土壤水分利用率高低可以直观反映草地水分生产力。分析不同年度有效降水量, 土壤供水量及土壤耗水量, 才有可能全面掌握多年生牧草对土壤水分的需求, 从而才能有效地提高人工草地土壤水分生产力。

有效降水系指生长季节内降水量与径流深之差, 而径流系数反映了坡地不同人工草地降水对降水拦蓄、截留作用的大小。人工草地生育年限不同, 其径流系数变化也较大(表 3), 2 年生沙打旺, 在降水量仅为 457.8mm 的情况下, 径流系数高达 8.4%, 较其它人工草地均大; 而 3 年生沙打旺, 在降水量高达 658.0mm 时, 径流系数仅为 2.9%, 较其它人工草地均小。比较 2 年生和 3 年生不同人工草地径流系数大小, 可以看出, 沙打旺拦蓄截留作用强, 红豆草和紫花苜蓿较弱。

在有效降水量为 419.4~448.4mm 的 1984 年, 紫花苜蓿和红豆草 2m 土层水分得到恢复; 在有效降水为 627.8~639.2mm 的 1985 年, 不同人工草地在不同程度上有所恢复。表明了年平均降水量为 500mm 左右黄土丘陵沟壑区, 自然降水可基本上满足多年生牧草 3 年水分需求。

表3 不同降水年份人工草地土壤水分利用率

Tab. 3 Utilization rate of soil water in different year

|           | 生长季节<br>降水量<br>(mm) | 径流深<br>(mm) | 径流系<br>数<br>(%) | 有效降<br>水量<br>(mm) | 生长季节<br>初贮水量<br>0-200cm | 生长季节<br>末贮水量<br>0-200cm | 土壤供<br>水量<br>(mm) | 人工牧草<br>耗水量<br>(mm) | 净地上初<br>级生产量<br>(kg/亩) | 水分利<br>用率<br>(kg/mm) |       |
|-----------|---------------------|-------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|----------------------|-------|
| 1984<br>年 | 草木栖                 | 457.8       | 9.4             | 2.1               | 448.4                   | 404.4                   | 377.6             | 26.8                | 431.2                  | 162.9                | 0.378 |
|           | 苜蓿                  | 457.8       | 27.6            | 6.0               | 430.2                   | 391.4                   | 433.9             | -42.1               | 388.1                  | 105.0                | 0.271 |
|           | 沙打旺                 | 457.8       | 38.4            | 8.4               | 419.4                   | 381.1                   | 223.9             | 157.2               | 576.6                  | 639.9                | 1.109 |
|           | 红豆草                 | 457.8       | 19.4            | 4.2               | 438.4                   | 389.7                   | 409.7             | -20.0               | 418.4                  | 90.0                 | 0.215 |
| 1985<br>年 | 草木栖                 | 658.0       | 28.4            | 4.3               | 629.6                   | 355.6                   | 464.8             | -109.2              | 520.4                  | 131.4                | 0.252 |
|           | 苜蓿                  | 658.0       | 34.2            | 5.2               | 623.8                   | 340.6                   | 464.2             | 123.6               | 500.2                  | 165.9                | 0.332 |
|           | 沙打旺                 | 658.0       | 18.8            | 2.9               | 639.2                   | 360.2                   | 379.2             | -19.0               | 620.0                  | 814.3                | 1.313 |
|           | 红豆草                 | 658.0       | 36.2            | 5.5               | 621.8                   | 372.9                   | 461.1             | -88.2               | 533.6                  | 134.5                | 0.252 |

从表3可以明显看出,生育期有效降水较高的1985年,人工草地水分利用率明显高于1984年,所不同的是,草木栖水分利用率反而有所降低。这可能是因为草木栖为两年生豆科牧草,一般第一年生长状况远不如第二年良好。该试验9年内,2年生草木栖连茬种植5次,1984年为草木栖生长的第2年,而1985年为草木栖第2茬生长的第一年,因而生物量低于1984年。反映了人工草地不同生育年份对土壤水分利用情况不同。比较不同人工草地对土壤水分利用率的影响,沙打旺明显高于其它牧草,以红豆草对土壤水分利用率最低。

### 3 人工草地水土流失状况

在陕北黄土丘陵沟壑区,分布面积较为广泛的坡耕地,水土流失严重,它不仅是黄河泥沙的主要来源地,而且也是造成土壤肥力退化,生产力低下的主要原因。因此人们长期治理坡耕地水土流失,培肥地力,其中最为有效的一项措施就是退耕还草,保持水土,发展畜牧业,实现生态经济良性循环。但影响牧草地水土流失的因素很多,主要因素是降雨因素、地形因素及植被因素。因此,研究和探讨不同人工草地水土流失与降雨因素、植被因素之间的关系,可以有效地控制人工草地水土流失,提高人工草地生产力。

#### 3.1 降雨因素、植被因素对人工草地水土流失的影响

在坡度为32°人工草地上,由于植被截留及土壤稳渗值不同,草木栖、紫花苜蓿、沙打旺、红豆草及裸地9年平均径流量依次为19578m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>·a、14099m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>·a、17789m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>·a、19353m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>·a和31353m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>·a,人工草地拦蓄效益依次为37.5%、55.0%、40.1%和43.3%;人工草地土壤侵蚀模数依次为1421t/km<sup>2</sup>·a、867t/km<sup>2</sup>·a、799t/km<sup>2</sup>·a和990t/km<sup>2</sup>·a,裸地土壤侵蚀模数为4267t/km<sup>2</sup>·a,人工草地减沙效益依次为66.7%、81.3%、79.7%和76.8%。表明人工草地水土保持效益显著,其中以沙打旺、紫花苜蓿效益尤为突出。

一次降雨量及降雨强度基本上可以反映降雨侵蚀力,由于不同人工草地生长年限不同,生长状况及根系分布不相同,表现在一次暴雨情况下,截留及抗冲蚀性能均不同。

当降雨量基本相同时,降雨强度不同,其水土流失相差也较大。如1983年9月份2次暴雨(表4),降雨量仅相差4mm,降雨强度为8倍之差,9月16日人工草地径流量为9月11日的1/3~1/8;而土壤侵蚀量相差甚大,9月16日,仅及9月11日的1/15~1/10。表明了降雨强度对侵蚀影响程度远大于径流量。

表 4 不同降雨因素对人工草地水土流失影响

Tab. 4 The relationship between rainfall factor and soil and water loss

| 降雨时间        | 降雨因素        |                | 草木栖                                       |                            | 紫花苜蓿                                      |                            | 沙打旺                                       |                            | 红豆草                                       |                            | 裸地  |                            |
|-------------|-------------|----------------|---|----------------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|
|             | 降雨量<br>(mm) | 降雨强度<br>(mm/h) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) |
| 1983. 9. 11 | 13. 6       | 40. 800        | 4447                                      | 242                        | 3317                                      | 267                        | 4212                                      | 461                        | 5200                                      | 457                        | 1684                                      | 6612                       |
| 1983. 9. 16 | 17. 6       | 5. 078         | 1200                                      | 16                         | 494                                       | 20                         | 671                                       | 28                         | 1023                                      | 46                         | 553                                       | 29                         |
| 1986. 6. 27 | 53. 6       | 3. 884         | 4941                                      | 688                        |   |                            | 84  | 4                          | 3292                                      | 350                        | 7880                                      | 638                        |
| 1988. 7. 06 | 18. 8       | 8. 808         | 4588                                      | 849                        |   |                            | 80  | 2                          | 3917                                      | 208                        | 1412                                      | 408                        |

表 5 不同降雨年限对人工草地水土流失影响

Tab. 5 the relationship between rainfall year and soiland water loss

| 降雨时间        | 降雨因素        |                | 草木栖                                       |                            | 紫花苜蓿                                      |                            | 沙打旺                                       |                            | 红豆草                                       |                            | 裸地  |                            |
|-------------|-------------|----------------|---|----------------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|
|             | 降雨量<br>(mm) | 降雨强度<br>(mm/h) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 径流量<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 侵蚀<br>(t/km <sup>2</sup> ) |
| 1983. 8. 9  | 74. 9       | 6. 658         | 19294                                     | 598                        | 18659                                     | 1050                       | 16541                                     | 1006                       | 21529                                     | 1180                       | 28471                                     | 2098                       |
| 1985. 8. 6  | 53. 3       | 15. 230        | 12941                                     | 3623                       | 12705                                     | 1874                       | 15765                                     | 1104                       | 16706                                     | 1337                       | 25647                                     | 2962                       |
| 1989. 7. 16 | 105. 1      | 9. 81          | 10652                                     | 1175                       | 13176                                     | 232                        | 13647                                     | 712                        | 17411                                     | 1161                       | 66823                                     | 9027                       |

当降雨强度相同,降雨量不同时,降雨引起人工草地产流产沙程度较小,但与裸地相比,径流和侵蚀影响程度较大。表明了人工草地具有缓冲降雨侵蚀力的功能。

人工草地随着生长年限的增加,达到 7—8 年后,开始衰退,天然草类侵入,生长逐渐繁茂,地面枯枝落叶增多,地下部根系庞大,向纵深方向发展,固土能力增强,土壤结构紧实,干土层增厚,构成了对自然降水层层拦蓄的能力,而且还可以减缓雨滴功能,减少雨滴直接击溅地表,土壤抗冲蚀性增强(表 5),水土流失减少。

### 3.2 人工草地水土流失方程的建立

美国 Wischmeier 等人经过 40 多年的研究探索,得出了坡面水土流失通用方程式 USLE(Universal soil-loess Equation), $A=RELSCP$ ,肯定了植被对防止水土流失的积极作用。多数研究者仅从地形因素、降雨因素方面对其进行修证。研究植被因素,特别是人工草地对水土流失影响方面者甚少,关于这方面的研究多从对比角度来进行分析,缺乏植被因素对水土流失影响的量化评价。为此,作者在陕北丘陵沟壑区,进行 9 年不同人工草地水土流失试验,其目的是建立起具有植被因子在内的水土流失方程,为人工草地有效地控制水土流失提供定量根据。

利用 1983~1991 年不同人工草地 27 次测定土壤侵蚀的资料,采用幂函数进行统计分析得下列方程式:

$$Ms = A \cdot P^{b_1} \cdot I^{b_2} \cdot S^{b_3}$$

式中:Ms 代表次侵蚀量,单位 t/km<sup>2</sup>;

P 代表降雨量,单位 mm

I 代表降雨强度,单位 mm/k

S 代表覆被度,单位 %。

A、b<sub>1</sub>、b<sub>2</sub>、b<sub>3</sub> 为待求参数

经相关分析,不同人工草地水土流失方程待求参数如表 6。

从表 6 可以看出 5 个方程的决定系数 R<sup>2</sup> 在 37.5%~49.1% 之间,平均 43.8%,因此选



表6 不同人工草地水土流失方程待求系数

Tab.6 Parameter of universal soil and water equation in different grassland

| 植被处理 | A      | b1     | b2     | b3      | F 值    | R 值      |
|------|--------|--------|--------|---------|--------|----------|
| 草木栖  | 0.6249 | 1.2755 | 1.5777 | 0.6831  | 3.50** | 0.6123** |
| 紫花苜蓿 | 0.1522 | 1.5036 | 1.6222 | -0.6751 | 5.64** | 0.6961** |
| 沙打旺  | 34.67  | 1.3605 | 1.7531 | -1.7718 | 5.78** | 0.7006** |
| 红豆草  | 0.0468 | 1.6193 | 1.3686 | -0.0563 | 5.28** | 0.6831** |
| 裸地   | 0.4255 | 1.3549 | 1.3339 | 0       | 5.71** | 0.6127** |

注:表中  $F_{0.01}=4.31, R_{0.01}=0.6523$ 

用降雨量、降雨强度及人工草地复被度3个因子可以给出土壤侵蚀量较满意的解释。根据各参数取值可以看出,人工草地土壤侵蚀量与降雨量有1.2755~1.6193次幂函数关系,与降雨强度有1.3686~1.6222次幂函数关系与人工草地复被度有-1.7718~-0.0563次幂函数关系。根据参数A, b1, b2, b3取植大小来看,似乎很难判断不同人工草地水土保持效益高低,表明了人工草地水土流失规律不可能完全由某一植被因子来决定。因此有必要将其参数A与植被复盖度参数b3固定起来,那么不同人工草地水土流失方程  $M_s = A \cdot P^{b1} \cdot I^{b2} \cdot S^{b3}$  就变为  $M_s = A^1 \cdot P^{b1} \cdot I^{b2}$  其中  $A^1 = A \cdot S^{b3}$  为植被、土壤等复合因子,  $A^1$  也就成为常数系数,如果把不同人工草地植被条件下的复被度按9年27次降雨产流时平均值来计算,不同植被条件下  $A^1$  取值如表7,便可基本上反映人工草地水土流失状况。

表7 不同人工草地植被下的  $A^1$  值Tab.7  $A^1$  in different grassland

| 植 被                             | 草木栖    | 苜蓿     | 沙打旺    | 红豆草    | 裸 地    |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 平均覆被度(%)                        | 36.86  | 21.82  | 70.95  | 27.18  | 0      |
| 年平均侵蚀模数<br>( $t/km^2 \cdot a$ ) | 1421   | 867    | 799    | 990    | 4267   |
| $A^1$ 值                         | 0.0532 | 0.0190 | 0.0189 | 0.0389 | 0.4255 |

#### 4 结语

根据人工草地土壤水分季节性变化规律,利用一元四次回归方程,可很好地模拟2m土层贮水量季节性动态;并将人工草地土壤水分季节性变化划分为三个阶段:春季失墒期、夏秋增墒期及秋末冬季缓慢失墒期。在此基础上模拟土壤水分季节性变化,得出不同人工草地2m土层季节性贮水量大小的趋势为:红豆草>紫花苜蓿>草木栖>沙打旺。

随着牧草生育期的延长,到第9年,不同人工草地2m土层贮水量趋于一致,在180~250mm含量范围内波动。在生长年限内不同人工草地土壤水分可有所恢复,但随着年限的增加,其恢复程度将逐渐减弱。

沙打旺在陕北黄土丘陵沟壑区,生存能力极强,它不但能够利用土壤深层贮水,而且拦蓄降水能力较强,应在干旱黄土区创造良好环境,积极推广。

人工草地土壤深层贮水对表层有显著的补偿作用,以沙打旺草地补偿能力最强;夏秋降水对人工草地土壤水分的补偿随着降雨量增大而增大,成直线关系,以草木栖和红豆草补偿能力较强。

沙打旺对土壤水分利用率明显高于其它牧草,而红豆草对土壤水分利用率明显低于其它牧草。

在坡度为 32° 的坡地上,不同人工牧草水土保持效益大小排序为:沙打旺、紫花苜蓿 > 红豆草 > 草木栖,多年生牧草水土保持效益大于 2 年生牧草。

利用幂函数回归方程可以很好地模拟不同人工草地的水土流失,并将植被复被度引入水土流失方程,可以定量描述对水土流失的影响。反映植被、土壤等因子与水土流失关系的复合因子——水土流失回归方程常量系数  $A'$ ,可基本代表不同人工草地水土流失状况。

### 参考文献

- [1]卢宗凡等,1988,黄土丘陵区水土保持生物和耕作措施的研究,水土保持学报, No. 1。
- [2]卢宗凡等,1988,干旱坡地草灌带状间作土壤水分变化的数学模型,水土保持学报, No. 1。
- [3]梁一民等,1990,沙打旺草地产量动态及水分利用研究,水土保持学报, No. 3。
- [4]李德广等,1987,旱地土壤水分的特征阶段、垂直类型和土壤水分预报,农业气象, Vol. 8, NO. 3。
- [5]余优森等,1987,人工草地土壤水分周年度变化规律的研究,土壤学报, Vol. 29, No. 3。
- [6]西北农大主编,1986年,耕作学,宁夏人民出版社。
- [7]张兴昌等,1993,农作物水土保持效益的数值化综合评价,水土保持学报, Vol. 7, No. 2。
- [8]杨文治等,1992年,黄土高原区域治理与评价,科学出版社。

## STUDIES ON THE DYNAMIC CHANGES OF SOIL MOISTURE AND THE BENEFITS OF SOIL AND WATER CONSERVATION FROM GROWING GRASSES ON THE LOESS PLATEAU

Lu Zongfan      Zhang Xingchang  
Su Min            Lin Hepin

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy  
of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi)

### Abstract

A nine years' experiment has been carried on to study the dynamic changes of soil moisture in artificial grasslands. The seasonal changes of soil moisture can be explained by three period in the year. With the growth of grasses year by year, the soil moisture content gradually drops and is difficult to restore. So the grasses absorb deeper bayer water. soil loss of artificial grassland can be effectively imitated by mathematical model.

**Key Words:** Artificial grassland, Dynamic change in soil moisture, Soil water supply, Benefits of water and soil conservation.