

# 黄土丘陵坡地的水热状况 与植被生产力

陈国良 穆兴民 程积民 韩仕峰 徐学选

(中国科学院水土保持研究所·陕西杨陵·712100)  
水利部

高桥 英纪 长沢 彻明

(日本北海道大学·札幌北区十条·060)

**摘要** 针对黄土丘陵区生态环境建设与水土资源开发利用的需要,在该区的主体部位——坡地上,应用多台自记监测装置,对坡地不同坡向、坡位,近地层的太阳辐射、气温、地温、土壤水分、以及以牧草为主的植被生产力的分布变化,进行了较为系统的实地观测研究,并分析揭示了它们的一些基本变化规律,对坡地的合理开发利用可提供气候与土壤生态学依据。

**关键词** 黄土坡地 水热状况 植被生产力

## Water—Heat Condition and Vegetation Productivity in Loess Hilly Sloping Land

Chen Guoliang Mu Xingmin Cheng Jimin Han Shifeng Xu Xuexuan

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

Hidenori TAKAHASHI

(Graduate School of Environmental Science, Hokkaido  
University, Kitaku, Sapporo, 060 Japan)

**Abstract** According to the needs of erecting eco—environment, exploiting and utilizing soil and water resources, authors had systemly surveyed several near to ground factors, such as sunlight, air and soil temperature, soil moisture, the distribution and statu of plant productivity which mainly consisted of grasses, by using several auto—count instruments in several sloping fields and in different site of the sloping fields. The authors also analysed and announced some of these basic variety law which could provide a few of climate—ecology basis. Those work above would benefit to reasonaly expoit and utilize sloping fields.

**Key words** loess sloping fields water—heat condition vegetation Productivity

黄土丘陵区系黄土高原的主体部位,总面积约 23.5 万 km<sup>2</sup>,其中坡地占 90%以上,是农、林、

草的主要种植之地。该区因地形起伏、沟壑纵横、土壤瘠薄、水热差异悬殊形成的气候—土壤生态环境复杂多样。为深入了解黄土丘陵山地不同部位、不同坡向的水热分布变化特征,以为农、林、牧合理布局与提高水、热资源利用率提供依据,从1986~1989年在植物生长季节对坡地水热变化与植被生产力进行了较系统实地观测与分析研究,兹将结果报导如下。

## 1 研究场所及其自然概况

黄土丘陵横贯黄土高原中部,东起太行山西麓,西至青海日月山。本研究系在黄土丘陵区西部的固原县上黄村与云雾山草场保护区进行。

上黄村地理位置为 $106^{\circ}26' \sim 106^{\circ}30' \text{E}$ ,  $35^{\circ}59' \sim 36^{\circ}03' \text{N}$ ;海拔高度1534~1824m。其所处的地区气候状况为:年总辐射量 $5342.4 \text{ MJ/m}^2$ ,年均气温 $7.0^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量472mm,干燥度指数1.55,无霜期152天。云雾山自然保护区,位于上黄村正北约28km,海拔1800m,年降水量450mm,二者地理气候环境十分相近。

基本水热要素观测,选在上黄村腰湾岭与对儿山上进行。其山顶海拔高度为1710mm,土壤为细黄土,山体四周坡度为 $11^{\circ} \sim 18^{\circ}$ 。该山头上部四个坡向各种植有条带沙打旺、苜蓿、柠条、沙棘等优良低矮草、灌(木)植物及天然荒草坡地,中下部为农耕地。该天然荒草坡地因坡地土壤水分不足,退化严重,其植被状况近乎裸地,故近地安置仪器不会造成遮挡。又为了研究天然草地的自然生产力,以云雾山草原自然保护区作为辅助测点。

## 2 所用仪器与研究方法

坡地太阳辐射是造成局地水热分布不均的能量基础。因此本研究的观测项目重在辐射,同时观测因太阳辐射不同造成的水热差异及植被生产力。

### 2.1 主要仪器设备与性能

太阳辐射仪:平地,传感器用“MS—42型ネオ日射计”,记录仪用全天候测定数据记录装置KADEC—UP”,传感器精度 $\pm 2.5\%$ 以内,以30min为间隔连续记录。坡地观测用“Sunstation Syssem 太阳能多点测定系统”仪。

温度仪:传感器用“标准型一三スタセニサ(KDC—SL)”,记录仪用多通道:全天候型测定数据记录装置[KADEC—U(UV)]”,传感器精度 $0.1^{\circ}\text{C}$ ,以60min时间间隔连续测定。

水分仪:以中子仪为主,结合使用土钻法,中子仪型号为美制D501,精度1%。

### 2.2 仪器安装

辐射与温度仪每种均为四套,分别设在距山顶约100cm处的E、S、W、N四个坡向上,其坡度 $11^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 。辐射仪按平行于坡面、距地面25cm处安置;气温探头置于离地面100cm处,外罩简易防辐射通风装置;地温探头分别埋于距地面5cm及15cm处。

### 2.3 测定时间

太阳辐射:平地每30min一次,逐时自动记录与贮存,最后通过计算机系统打印出日、旬、月记录。坡地每日一次,只记录日累积辐射量。

气温与地湿:每60min一次,自动完成资料采集与贮存。

土壤水分:每月一次,表层(0~100cm)每隔10cm、1m以下每隔20cm记录一个数据。

### 3 测定结果与分析

#### 3.1 太阳辐射

它是地方气候与局地小气候形成的基础,此处按当地植物主要生长季5~8月及生长季5~10月作如下汇总分析。两时段的旬、月太阳辐射量如表1、2。

3.1.1 太阳辐射总量( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) A. 5~8月:平地为2055MJ,坡地为1654~1746MJ,其中 $E>S>W>N$ (坡),各占平地辐射总量的85%、83%、82%、80.5%。

B. 5~10月:各坡向辐射总量在2188~2369MJ之间,其大小次序与5~8月一致,即 $E>S>W>N$ (坡)。如以东坡为100%,S、W、N坡依次为99.6%、94.6%和92.4%。

3.1.2 太阳辐射量的旬、月分布 A. 旬量分布:均以5月下旬为最高,达179~195MJ,随后缓慢起伏下降,至9月下旬、10月上旬达最低,其值为70.4~88.9MJ之间,各坡向旬辐射量分布除高值有一定规律外,中、低值出现的坡向变化不定。高值,5~7月出现在东坡,8~10月出现在南坡。这是因为,一般雨季(7月)前,当地上午天空晴朗、大气清洁,下午则多大风、沙尘、阵雨,故东坡辐射量高;至雨季来临,空气湿润、多云(雨),且太阳入射位置偏南,故自夏末入秋,旬辐射量高值出现在南坡。

B. 月量分布:高值出现时间,南坡在5月,西坡与北坡在6月,其值为444~472MJ,相当于平面辐射的85%~87%;月最低值各坡向均出现在10月,为237~296MJ。各月中月总量随坡向分布与旬值近似,即5~7月东坡最大,8~10月南坡最大。最小值出现的坡向,5~7月无定,8~10月均出现在北坡,其值约相当于南坡(最高)的百分比为:8月95.7%,9月84.9%,10月76.4%,11月47.5%。

表1 上黄村5~10月各旬太阳辐射量( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )

月	旬	5			6			7			8			9			10	
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中+下
东	坡	102	174	195	168	133	151	142	151	151	105	138	135	98	140	89	92	204
南	坡	99	174	189	169	129	144	137	148	127	106	138	140	103	151	94	96	216
西	坡	93	166	179	162	131	151	131	150	148	100	133	138	97	133	82	77	170
北	坡	84	133	188	167	131	147	137	148	152	105	133	131	96	129	70	55	154
平	地	113	201	224	194	155	175	165	186	170	133	170	170	—	—	—	—	—

表2 上黄村5~10月各月太阳辐射量( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )

月	项目	5		6		7		8		9		10		5~8月		5~10月	
		量	%	量	%	量	%	量	%	量	%	量	%	量	%	量	%
东	坡	472	88	453	86	444	85	378	80	327	94	296	95	1746	86	2396	100
南	坡	462	86	442	84	412	79	385	81	348	100	312	100	1701	83	2361	99.6
西	坡	438	81	445	85	428	82	371	79	312	90	247	79	1612	82	2240	94.6
北	坡	405	75	444	85	437	84	368	78	296	85	239	76	1654	80.5	2188	92.4
平	地	538	100	524	100	521	100	473	100	—	—	—	—	2055	100	—	—

#### 3.2 气温

3.2.1 坡地气温特征值各坡向的气温平均、平均最高及平均最低如表3。由表见:

月平均气温:各坡向间差异不显著,最大差为 $0.5^{\circ}\text{C}$ (5月),最小差仅 $0.1^{\circ}\text{C}$ (6~8月)。5月平均气温: $E>W, S>N$ 。

月最高气温:各坡向间最大差异 $0.5^{\circ}\sim 0.7^{\circ}\text{C}$ 。5月南坡最高( $21.5^{\circ}\text{C}$ ),北坡最低( $20.8^{\circ}\text{C}$ );7月北坡、西坡最高( $24.8^{\circ}\text{C}$ ),南坡最低( $24.2^{\circ}\text{C}$ )。

月最低气温分布与平均气温、平均最高气温类似。

3.2.2 坡地气温日变化模式 A. 气温日变化模式。图1、图2是逐时各月平均气温日变化过程曲线,在昼夜变化过程中有一最高值和一最低值,属单峰型曲线。图1~2可用下述谐波模型

来拟合：

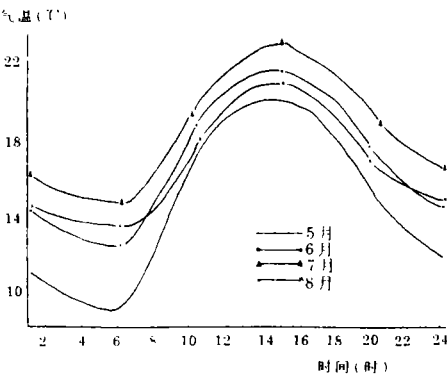


图1 5月~8月坡地气温日变化

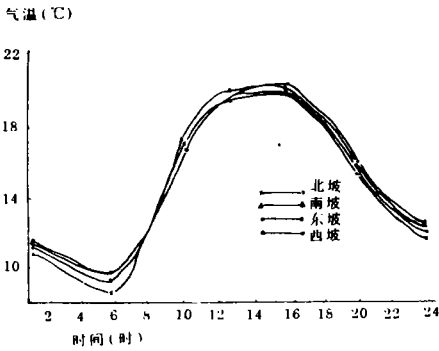


图2 5月南坡气温日变化

$$\theta(z,t) = \theta(z) + \sum_{k=1}^n A(z,k) \cdot \sin \{k\omega t + \varphi(z,k)\} \tag{1}$$

式中 $\theta(z,t)$ 表示 $t$ 时刻 $z$ 处的温度, $A(z,k)$ 表示 $z$ 处第 $k$ 个谐波分量的振幅和初始位相。 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , $T$ 为周期长度,若为日变化,则 $T = 24$ 。

模型参数的实际意义。 $\theta(z)$ 表示 $z$ 处的月平均日温;当 $k = 1$ , $A(z,1)$ 表示 $z$ 处温度日较差大小, $\varphi(z,1)$ 表示 $z$ 处温度日波的温度位相。

表3 坡地气温特征值

月 份		5			6			7			8		
		平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低
东 坡		15.0	21.1	8.9	17.4	23.0	12.4	19.1	24.3	14.2	17.1	22.9	13.3
西 坡		14.9	21.4	8.7	17.3	23.6	12.1	19.2	24.9	14.5	17.3	22.8	13.1
南 坡		14.9	21.5	8.5	17.3	23.3	12.1	19.0	24.2	14.5	17.1	22.1	13.0
北 坡		14.5	20.8	7.7	17.3	23.4	12.1	19.1	24.8	14.5	17.2	22.2	13.1
极 差		0.5	0.7	1.2	0.1	0.6	0.3	0.2	0.5	0.3	0.2	0.2	0.3
平 均		14.8	21.2	8.5	17.3	23.3	12.2	19.1	24.6	14.4	17.2	22.5	13.1
平 地		14.0	20.9	7.1	17.2	23.0	11.9	19.3	24.8	14.7	17.5	22.5	14.2

\* 指观测场百叶箱内气温。

由图1(5~8月),各月逐时平均气温日变化过程可见:各坡向间温度差异5月最大,7月差异不明显,因此这里只列出5月各坡向逐时平均气温日变化过程谐波模式参数(表4)。由表4见: $A(100,1)$ 值远比 $A(100,2)$ 值大,说明各月气温日变化过程中日波占主导地位。四个坡向中,日波振幅 $A(100,1)$ : $N>S>W>E$ ,即北坡日较差最大,东坡最小;四个坡向中,日波初始位相: $E>N>S>W$ (坡),即东坡极端温度出现的时刻最早,西坡最晚。东坡最低温度出现的时间为5~6h,最高温度在15~16h出现。

B. 气温日变化过程的季节变化 图1与图2相比,不同月份气温日变化过程基本类似。从5月至7月逐时气温呈递增趋势,但递增幅度不同,以06时和15时增加最多,分别达3.5℃和5.5℃。至8月温度开始降低,夜间(22h至次日7h30min)降低1.0℃~1.5℃;昼间(7h30min至22h)降低0.8~1.7℃。具体以南坡为例:5月平均瞬时最高气温20.1℃,最低9.0℃,日较差11.

1℃;6 月平均瞬时最高 22.0℃,最低 12.6℃,日较差 9.4℃;7 月平均瞬时最高 23.6℃,最低 14.9℃,日较差 8.7℃;8 月平均瞬时最高 21.3℃,最低 13.7℃,日较差 7.6℃。5 月日较差最大,8 月最小。

表 4 5 月坡地气温日变化模式参数

参 数	$\theta(100)$	$A(100,1)$	$\varphi(100,1)$	$A(100,2)$	$\varphi(100,2)$	复相关指数 R	均方误 $S_y$
南 坡	14.90	5.41	223°06′	0.96	74°26′	0.994	0.49
东 坡	15.00	5.07	280°36′	0.90	75°53′	0.993	0.47
西 坡	14.90	5.28	220°42′	0.85	57°46′	0.994	0.47
北 坡	14.52	5.50	223°30′	0.93	87°04′	0.991	0.59

\* 表中  $\theta(100)$ 指高 100cm 处日平均气温, $A(100,1)$ 指 100cm 处平均气温日较差。

表 5 不同坡向不同深度地温特征值

月 份		五			六			七			八		
坡向	深 度	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低
东坡	5cm	16.6	23.9	10.4	19.1	25.4	14.1	20.9	27.1	16.4	18.5	23.9	14.7
	15cm	16.3	20.8	12.1	19.0	22.9	15.6	20.9	24.8	17.7	18.7	21.9	15.9
西坡	5cm	16.9	24.6	10.7	19.8	26.5	14.6	21.8	—	17.8	19.6	25.3	15.3
	15cm	16.5	21.7	12.0	19.5	24.0	15.7	21.6	—	19.0	19.4	23.4	16.5
南坡	5cm	16.5	23.8	18.7	18.7	23.2	14.3	20.6	26.0	16.5	18.5	23.0	16.2
	15cm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
北坡	5cm	16.2	23.6	9.8	19.4	25.6	14.4	21.2	26.9	16.8	19.1	24.1	15.4
	15cm	15.6	20.8	10.9	19.0	22.4	16.3	20.9	25.0	17.6	18.8	22.2	16.0
平地	5cm	18.3	—	—	21.3	—	—	23.2	—	—	20.9	—	—
	15cm	16.8	—	—	20.2	—	—	22.3	—	—	20.5	—	—
坡向差异	5cm	0.3~0.70	0.7~1.08	0~8.90	0.7~1.10	0.9~3.30	0.2~0.50	0.6~1.20	0.2~1.10	0~1.40	0.5~1.11	0.2~2.30	0.8~1.5
	15cm	0.2~0.4	0.9	0.5~1.2	0.5	0.8~1.10	0.6~0.7	0.7	—	1.3~1.40	0.6~0.91	0.2~1.30	0.5~0.6
坡地与平地差	5cm	—1.4~2.1	—	—	—1.5~2.6	—	—	—1.4~2.6	—	—	—1.5~2.4	—	—
	15cm	—0.3~1.2	—	—	—0.7~1.2	—	—	—0.7~1.4	—	—	—1.1~1.8	—	—

3.2.3 坡地气温增温率 增温率系指最低气温到最高气温出现的时段内,单位时间内气温升高的度数(℃/h)。以 5 月最为显著,其增温率: N(1.24)>S(1.08)>W(0.97)>E(0.94℃/h) 坡。6~8 月则差异不大,均在 1.0℃/h 左右。

3.3 地温

3.3.1 坡地地温变化特征 5cm 地温,各坡向平均值与最高值,大体以西、北坡高,而东、南坡低。但总的是平均值差异不大,夏初(5 月)为 0.3~0.7℃,夏季(6~8 月)为 0.5~1.2℃;最高值差异居中,5、7 月在 1.1℃以内,6、8 月差异较大,达 2.3~3.3℃;最低值,则夏初差异悬殊,高达 8~9℃,南坡大、北坡小,6~8 月差异较小,6 月为 0.2~0.5℃,7~8 月为 0.8~1.5℃。15cm 地温,各坡向各值差异要小于 5cm 的差异,一般在 0.5~1.0℃之间。而无论 5cm 与 15cm,各坡 5~8 月的各值均小于平地,其中 5cm 差异大,为 1.4~2.5℃,15cm 差异小,5~7 月大多为 0.7~1.4℃,8 月有所增大,达 1.1~1.8℃。

3.3.2 坡地地温日变化模式 图 3(a~d)为 5 月和 7 月平均地温日变化过程,这种变化过程与气温类似,也可用模型(1)来拟合,其参数如表 6。比较 5 月和 7 月地温日变化模型参数,其  $\theta(z)$  值随深度  $z$  增加而减小,表明平均地温降低;地温变化的日波振幅与气温相似,即  $A(z,1)$  比  $A(z,2)$  大,表示地温月变化也是以日波为主;又日波分量的振幅  $A(z,1)$  随深度增加而减小,即温度日较差减小,5 月比 7 月减小幅度更大;再地温日波初始位相  $\varphi(z,1)$  随深度增加而减小,且 5 月与 7 月差异不大,表明随深度增加,极端地温出现的时间推后,且 5 月与 7 月出现时间基本一致。5cm 地温的位相  $\varphi(z,1)$  值在四个坡向中南坡最大,西坡最小;15cm 地温位相在东西北三个方位上,则以北坡最大,西坡最小。

表 6 坡地平均地温月变化模型参数\*

参数**		$\theta(z)$		$A(z,1)$		$\varphi(z,1)$		$A(z,2)$		$\varphi(z,2)$		均方误 $S_y$	
月		5月	7月	5月	7月	5月	7月	5月	7月	5月	7月	5月	7月
东坡	5cm	8.29	10.50	5.96	4.66	210°53'	209°40'	1.36	1.15	29°39'	17°11'	0.28	0.11
	15cm	8.16	10.47	5.84	2.79	184°59'	183°40'	0.72	0.68	351°25'	339°54'	0.12	0.05
西坡	5cm	8.44	10.90	6.16	4.92	202°59'	200°33'	1.20	1.31	4°22'	35°59'	0.20	0.12
	15cm	8.23	10.78	4.30	3.46	183°55'	180°10'	0.78	0.83	336°38'	329°41'	0.07	0.11
南坡	5cm	8.25	10.28	5.45	3.83	214°19'	212°17'	1.54	1.14	47°40'	35°59'	0.42	0.25
	15cm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
北坡	5cm	8.07	10.62	6.18	4.36	206°38'	203°54'	1.38	1.07	22°22'	5°00'	0.42	0.14
	15cm	7.82	10.83	4.42	3.26	187°51'	186°02'	0.89	0.73	352°22'	340°17'	0.18	0.10

\* 每个地温模型的复相关指数 R 在 0.995~0.9998 之间 \* \* 参数中 Z=5、15,分别表示 5cm、15cm 地温模型参数

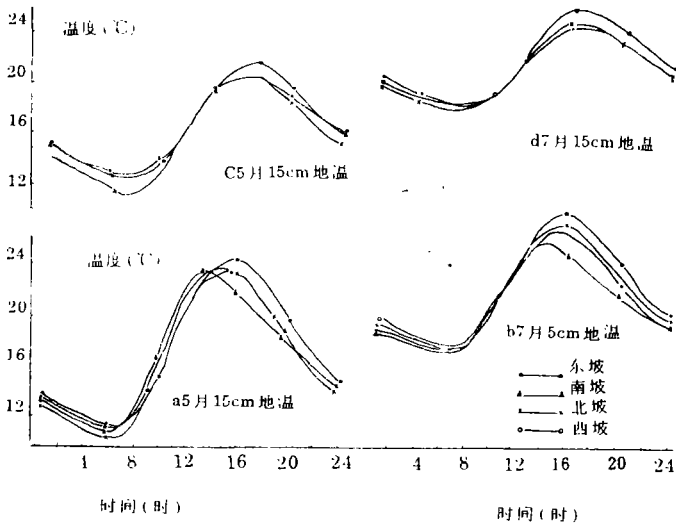


图 3 5月、7月坡地温日变化

极端地温出现的时间。相同月份、同一深度、不同坡向间最低温出现时间基本一致。5cm 最低地温 5 月出现在 5~6h,7 月出现在 7h 左右;最高地温以东坡和南坡出现最早(14~15h),北坡和西坡较晚,相差约 2 个 h。随深度增加,15cm 的最高、最低地温出现的时间比 5cm 延后 1~2 个 h。

3.3.3 坡地地温日较差 坡地地温日较差如表 7。地温日较差总的是随深度增加而减小,其中 5cm 为 8~13℃,15cm 为 6~9℃,日较差的分布总的是西坡大,南坡小,差幅为 0.8~2.1℃,以 5 月相差最小(0.8℃),8 月相差最大(2.1℃)。

表 7 坡地地温日较差

月 份		5 月		6 月		7 月		8 月	
		5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15
东 坡	坡	12.3	8.1	10.3	6.6	10.0	6.3	8.5	5.6
	坡	12.8	9.0	10.9	7.6	10.4	7.2	9.2	6.5
西 坡	坡	12.0	—	9.1	—	8.6	—	7.1	—
	坡	12.9	9.3	10.3	7.5	9.5	7.0	8.0	5.7

3.4 坡地气温与地温的比较

上述分析表明:坡地的气温、地温随坡地方位、时间及土壤深度不同而不同。气温和地温由于太阳辐射及热能传播介质的不同,导致二者之间变化存在着某些差异。

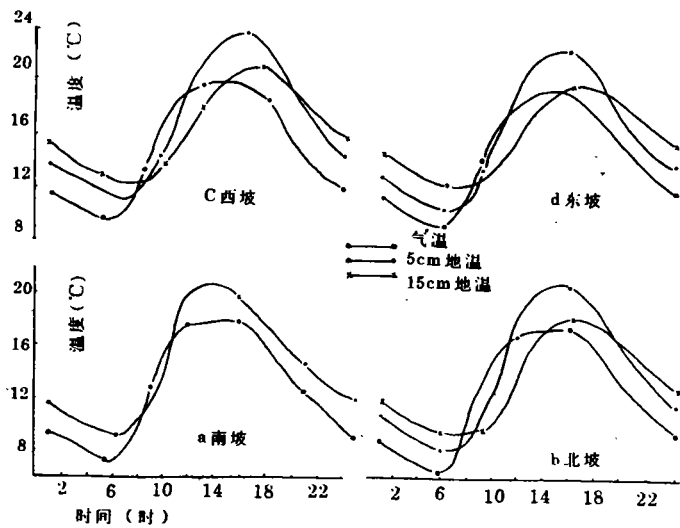


图4 坡地地温、气温日变化

表 8 不同坡向温度日较差

坡 向	东 坡		西 坡		南 坡		北 坡	
月份	5	7	5	7	5	7	5	7
气温日较差	10.3	8.4	10.7	9.0	10.8	8.7	11.2	9.0
5cm 地温日较差	12.3	10.0	12.3	10.4	12.0	8.6	12.9	9.5
15cm 地温日较差	8.1	6.3	9.0	7.2	8.6	—	9.3	7.0

A. 位相不同： 气温和地温月变化过程都属单峰型,且可用模型(1)来拟合,但二者变化的位相不同(如图 4)。一般平均最低、平均最高温度出现时间气温比 5cm 地温早 1h,比 15cm 地温早 2 个多 h。温度日变化过程中,在 12~16h,由于空气中湍流扰动加强,使气温变化曲线出现了波动,不像地温曲线那样光滑。

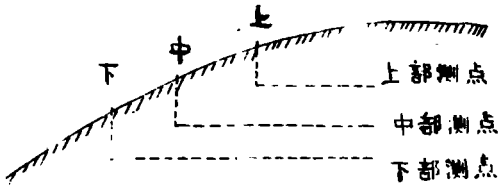


图 5 坡地土壤水分测定位置示意图

B. 平均值和月较差不同： 一般,月平均地温及平均最低地温比平均气温和平均最低气温高,但 15cm 平均最高地温比平均气温低(见表 3、表 5)。

温度日较差如表 8:5cm 地温日较差最大(8.6~12.9℃),15cm 地温日较差最小(6.3~9.3℃),气温日较差介于二者之间(8.4~11.2℃)。

3.5 土壤水分

3.5.1 测点选择与测定方法 试验系在上黄村有代表性的平直坡面上进行长期定位观测的结果。各坡面的坡向、坡度如表 9。每个坡面从上至下每隔 20m、40m 和 60m 各选一点代表坡的上部、中部和下部三个坡位(如图 5),测定时间,每年从 4 月~11 月每月测定一次 2m 土层的土壤含水量。测定方法为土钻法。本文资料年限为 1985 年 6 月~1989 年底。

3.5.2 测定期降水状况 由表 10 可见,除 1985 年年降水较丰,1988 年为平水年外,其余各年均均为欠水年,尤以 1986 年降水最少。表明,试验期内分别有旱、平、丰三种不同降水年型。

表 9 坡地土壤水分测点的坡向和坡度

坡 向		南坡(S)	东坡(E)	西坡(W)	北坡(N)
方 位	位 度	偏西 20° 19°	偏北 20° 15°	正西 18°	偏东 30° 15°
坡 度					

表 10 试验年与历年平均降水比较

年 份	春 季 (mm)	夏 季 (mm)	秋 季 (mm)	冬 季 (mm)	年	
					量(mm)	与平均比(%)
1985	(114.4)	209.2	166.5	—	490.1	—
1986	37.9	204.8	39.5	2.5	284.8	59.6
1987	63.4	167.5	91.1	2.8	324.6	67.9
1988	118.6	255.5	54.6	9.9	438.6	91.7
1989	68.3	209.5	62.9	16.9	358.3	74.9
历史平均	81.0	264.7	124.8	7.6	478.2	100

表 11 天然草坡地年平均土壤含水量 单位: %

年 份	南 坡			北 坡			东 坡			西 坡		
	0~2 (m)	0~1 (m)	1~2 (m)	0~2 (m)	0~1 (m)	1~2 (m)	0~2 (m)	0~1 (m)	1~2 (m)	0~2 (m)	0~1 (m)	1~2 (m)
1985	12.9	12.3	13.4	13.5	15.0	11.9	14.3	16.3	12.4	11.7	11.7	11.7
1986	11.2	9.3	13.1	12.0	12.3	11.7	11.9	12.2	11.6	11.0	10.0	12.0
1987	9.0	7.9	11.0	9.7	9.2	10.1	9.2	8.6	9.7	8.3	7.4	9.2
1988	9.6	8.9	10.2	9.3	10.0	8.6	10.3	11.4	9.1	8.0	8.6	7.4
1989	8.4	7.3	9.5	8.6	9.0	8.1	6.5	10.4	8.5	7.3	7.5	7.1
平 均	10.2	9.0	11.4	10.6	11.1	10.1	11.0	11.8	10.3	9.3	9.0	9.5

\* 固原气象站 1958—1989 年资料

表 12 天然牧荒地不同坡位土壤含水量 单位: %

年份	土层 (m)	南 坡			北 坡			东 坡			西 坡		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
1985	0~2	13.0	12.1	11.9	13.6	12.3	12.5	14.3	13.9	14.7	11.7	11.9	12.0
	0~1	12.6	11.6	12.2	15.3	12.3	13.1	16.2	15.3	16.1	11.7	12.0	13.1
	1~2	13.4	12.6	11.6	11.9	12.2	11.9	12.4	12.5	13.2	11.7	11.7	10.9
1986	0~2	11.3	11.1	10.5	12.0	11.1	10.4	12.0	12.0	12.7	11.0	10.6	10.9
	0~1	9.3	8.8	9.0	12.3	10.8	10.1	12.3	11.9	12.9	10.0	9.3	10.2
	1~2	13.3	13.3	12.0	11.7	11.4	10.6	11.6	12.5	12.5	12.0	11.9	11.5
1987	0~2	9.1	9.1	8.2	9.2	8.9	8.1	9.2	8.9	9.8	8.4	8.2	8.3
	0~1	7.2	6.8	6.8	8.3	8.3	7.5	8.7	8.2	9.3	7.5	7.0	7.4
	1~2	10.9	11.4	9.5	10.1	9.5	8.7	9.7	9.6	10.03	9.3	9.3	9.2
平均	0~2	11.1	10.6	10.2	12.0	10.8	10.3	11.8	11.6	12.4	10.4	10.2	10.4
	0~1	9.7	9.1	9.3	12.0	10.5	10.2	12.4	11.8	12.8	9.7	9.4	10.2
	1~2	12.5	12.1	11.0	11.9	11.0	10.4	11.2	11.4	12.0	11.0	11.0	10.5

3.5.3 测定结果与分析 A 不同坡向土壤含水量变化特点:如表 11。由表见,0~2m 土层含水量东坡>北坡>南坡>西坡;但 1~2m 土层含水量是:南坡>东坡>北坡>西坡;此外,4 个坡向中,东坡、北坡 0~1m 土层含水量大于 1~2m 土层含水量,南坡与西坡则相反。土壤含水量随坡向和不同土层的这种分布特征的形成是地理条件、坡地小气候和天然植被条件综合作用的结果。①南坡和西坡的辐射平衡比北坡和东坡高,蒸发力强,土壤失水多,土壤含水量低,生产上称之为“旱阳坡”或“干旱坡”。②由于干旱和人为破坏致使南坡和西坡植被稀疏,土壤水分消耗以土壤蒸发为主,植物蒸腾耗水甚微,而北坡和东坡植被盖度相对较大,植物蒸腾较南坡和西坡大。土壤蒸发依靠土壤毛管作用传输水分,主要消耗上层水分,蒸腾靠根系吸收水分,具有较强抗旱性的天然植被吸收了深层土壤贮水,导致北坡和东坡深层贮少减少,土壤含水量相对较低。

B 不同坡位土壤含水量分布: 如表 12,表明:(1)0~2m 土层平均土壤含水量,南坡、北坡从坡的上部至下部逐渐降低,东坡和西坡则是上部 and 下部含水量高,中部含水量低。(2)不同土层各坡位土壤含水量变化特征:0~1m 土层与 0~2m 土层含水量变化趋势基本一致。1~2m 土层



含水量南坡、北坡及西坡由坡的上部至下部逐渐降低,东坡与此相反。总之这里的变化比较复杂,并不象 E. H 罗曼诺娃<sup>[1]</sup>分析的从上至下由于径流作用,含水量有规律的增加。

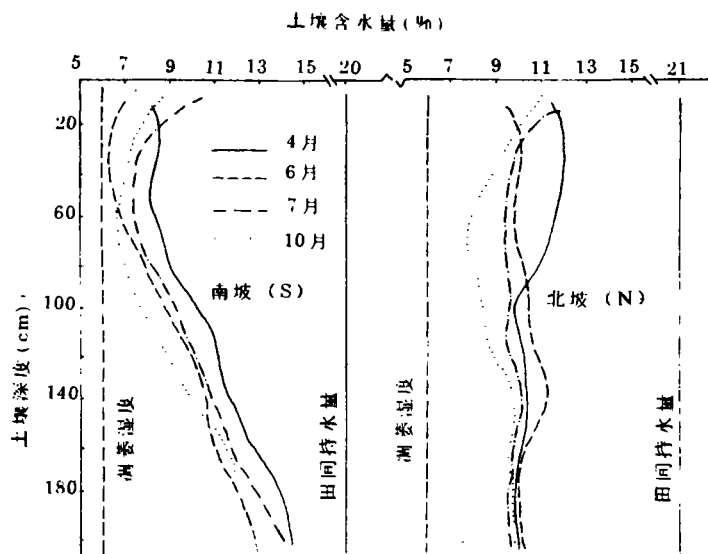


图6 坡地土壤含水量时间变化

表 13 天然牧荒地与平地土壤含水量 单位: %

年 份	土层(m)	南 坡	北 坡	东 坡	西 坡	平 均	平 地
1986	0~2	9.9	10.7	9.9	9.8	10.3	7.9
	0~1	7.3	10.0	8.8	8.1	9.1	7.2
	1~2	12.4	11.3	11.0	11.4	11.5	8.6
1987	0~2	9.2	9.8	9.2	7.9	9.0	8.4
	0~1	6.6	9.0	8.5	6.6	7.7	8.1
	1~2	11.7	10.5	9.8	9.1	10.3	8.6
1989	0~2	8.4	8.6	9.5	7.3	8.5	8.4
	0~1	7.3	9.0	10.4	7.5	8.6	9.3
	1~2	9.5	8.1	8.5	7.1	8.3	7.5
平 均	0~2	9.2	9.7	9.5	8.3	9.2	8.2
	0~1	7.1	9.3	9.2	7.3	8.4	8.2
	1~2	11.2	10.0	9.8	9.2	10.0	8.2

C 坡地与平地(荒地)土壤含水量: 同期坡地与平地(荒地)土壤含水量如表 13。表明: 3 年平均 0~2m 土层含水量平地低于坡地,1~2m 土层亦是如此;0~1m 土层含水量北坡和东坡高于平地,南坡和西坡低于平地。一般平地蒸发力比南坡和西坡低,比北坡和东坡高<sup>[1][3]</sup>,平地人为破坏小,植被生长比坡地旺盛,导致上层土壤含水量平地高于南坡和西坡,而低于北坡和东坡,深层贮水平地低于所有坡向坡地,这与太阳辐射与风力影响有关,两者在坡顶均比在坡面强。

D 坡地土壤水分的垂直变化: 以南坡和北坡为例。图 6 是 1986—1989 四年平均资料(表 14)点绘的。由图表可见:(1)南坡土壤含水量(W)随深度(H)变化服从  $W = A + B \times H + C \times H^2$  函数关系,而北坡则变化复杂;(2)耗水(水分变动)深度,南坡比北坡深,据推算南坡在 2.3m,北坡在 1.7m 左右,但最干旱土层在 50cm 左右;(3)深层(1.4m 以下)贮水,南坡高于北坡,这都与太阳辐射和植被长势有关;(4)根据含水量的变异系数等,可把土壤含水量随深度变化,南坡分为 3 层,北坡分为 4 层。0~20cm 为突变层,变异系数大于 40%;20~40cm 为易变层,变异系数 20%~30%;南坡 40~200cm,北坡 40~130cm 为不稳定层,变异系数 10%~20%;北坡 130~200cm 为相对稳定层,变异系数小于 10%,而南坡在 2m 以上尚未出现稳定层,说明干湿变

化剧烈,对植被易形成干旱威胁。

表 14 天然牧荒坡地年平均土壤含水量及变异系数

坡 向	南 坡										北 坡									
	1986 年		1987 年		1988 年		1989 年		平均		1986 年		1987 年		1988 年		1989 年		平均	
深度(cm)	X	CV.	X	CV.	X	CV.	X	CV.	X	CV.	X	CV.	X	CV.	X	CV.	X	CV.	X	CV.
0~20	8.0	39	8.4	54	13.0	26	3.9	58	9.5	44	11.2	23	6.2	87	14.3	24	8.9	58	10.2	48
20~40	8.2	35	7.3	46	8.2	28	6.9	29	7.7	35	12.6	27	9.4	15	9.7	18	6.9	29	9.7	22
40~60	9.0	30	5.8	9	7.0	17	5.9	9	7.0	16	12.8	25	8.0	14	8.2	8	5.9	8	8.7	14
60~80	10.0	20	6.4	10	7.2	13	6.5	14	7.5	14	12.9	29	8.5	20	7.6	9	6.5	13	8.9	18
80~100	11.3	20	7.9	16	7.5	13	7.5	19	8.6	17	12.2	7	9.5	17	7.8	8	7.5	19	9.3	13
100~120	11.8	18	8.8	20	8.4	12	8.0	13	9.3	16	12.0	6	9.7	18	8.5	7	8.0	13	9.6	11
120~140	12.5	12	9.8	15	9.4	12	8.6	8	10.1	12	11.9	4	10.7	16	8.5	7	8.6	8	9.9	9
140~160	12.5	13	10.9	15	10.3	12	9.5	5	10.8	11	11.9	3	10.4	15	8.8	8	9.5	5	10.2	8
160~180	14.0	12	11.9	8	12.1	12	10.2	9	12.1	10	11.7	3	9.7	4	8.8	3	10.2	9	10.1	5
180~200	14.8	9	13.3	11	10.2	10	11.2	13	12.4	11	11.0	5	10.1	6	8.8	6	11.2	13	10.3	8

表 15 坡地水量平衡

年份	坡 向	土壤含水量		土壤耗水 (mm)	径流量 (mm)	降水量 (mm)	蒸散量 (mm)
		4 月(mm)	10 月(mm)				
1986	南坡	303	222	81	3.1	261.3	338.3
	北坡	321	243	78	3.1	261.3	335.3
	西坡	263	213	50	3.1	261.3	308.3
	东坡	330	222	108	3.1	261.3	366.3
	南坡	230	181	49	11.1	286.1	324.0
1987	北坡	228	209	19	11.1	286.1	294.0
	西坡	195	178	17	11.1	286.1	292.0
	东坡	218	206	12	11.1	286.1	287.0
	南坡	248	234	14	30.8	376.8	360.0
	北坡	202	220	-18	30.8	376.8	328.0
1988	西坡	164	195	-31	30.8	376.8	315.0
	东坡	229	251	-22	30.8	376.8	324.0
	南坡	205	207	-2	2.4	317.8	318.2
	北坡	218	168	50	2.4	317.8	370.2
	西坡	177	195	-18	2.4	317.8	302.2
1989	东坡	261	—	—	2.4	317.8	—
	南坡	247	211	36	11.9	310.5	335.6
	北坡	242	210	32	11.9	310.5	331.6
	西坡	200	195	5	11.9	310.5	304.8
	东坡	260	226	34	11.9	310.5	326.3

注：(1)蒸发量=(W<sub>1</sub>-W<sub>0</sub>)-降水量-径流量；(2)土壤耗水栏内，正值为亏，负值为盈；(3)东坡日出后有约半小时被山遮挡。

E 坡地土壤水量平衡:如表 15。由表知:(1)植物生长季 4~10 月,坡地的蒸散量平均在 305~335mm 之间,其中 90%来自大气降水,10%来自土壤贮水,且以南坡最大,西坡最小;(2)各坡向土壤水四年平均亏缺量在 5~36mm 之间,东、南、北坡亏缺量之间差异不大,在 32~36mm 之间,而西坡亏缺量最小,仅 5mm;(3)在测地气候、土壤、地形、植被条件下,坡地 2m 土壤水量年内收支状况与年降水量密切相关,大体趋势是以年降水 355mm 为介,大于 355mm 一般为盈余,小于 355mm 将出现亏缺,其亏缺量与介限值与年降水量之差相近。如 1987 年各坡向平均亏缺量为 24mm,当年降水量 325mm 与介限值 355mm 之差为 30mm,差 6mm;1986 年亏缺量平均为 79mm,介限值与降水值之差为 70mm,差 9mm。

3.6 植被生产力

试区地处半干旱典型干草原区,加之人、畜破坏,林木稀少,故植被生产力以当地的主体植被干草原的生产力测定为代表。又考虑本试验前在研究天然植被的生产力,故选在云雾山的草原自然保护区进行,其测定结果如表 17。

表 17 云雾山不同坡向种类组成数量和产草量变化

调查地	坡 向	坡度(度)	植物种数(种 50cm×50cm)	平均鲜草产量(g/m <sup>2</sup> )
A	NW	14.8	18	412
B	N	21.6	20	764
C	NW	37.0	19	424
D	S	30.4	8	320
E	SSW	27.0	12	212
F	SSE	24.6	14	232
G	W	13.4	17	616
H	WSW	16.4	18	568
I	W	27.8	14	360

3.6.1 不同坡向植被种类组成数量 不同坡向植被种类组成数量的差异较大,由表所示,坡向 N 和 NW 种类组成数量为(50cm×50cm)18~20 种,坡向 W、WSW 为 14~18 种,坡向 S、SSW、SSE 为 8~14 种。可见北坡的种类组成数量最高,西坡次之,南坡再次。群落中植物种类组成成分的多少与环境中水分的多少关系密切,呈明显的正相关,随着环境中水分的增多,植物种类组成数量随之增多。由于北坡的水分条件较好,西坡次之,南坡再次,所以出现了种类组成数量的相应变化。

3.6.2 不同坡向植被产草量 不同坡向植被的产草量差异亦较大,由表所示,坡向 N、NW 的产草量达 412~784g/m<sup>2</sup>,坡向 W、WSW 为 360~616g/m<sup>2</sup>,坡向 S、SSW、SSE 为 212~320g/m<sup>2</sup>。可见北坡植被的产草量最高,西坡次之,南坡再次。植被产草量的高低除与太阳辐射有关外,此处更与环境中水分的多少关系密切,在中生环境条件下,一般随着水分的增加植被的产草量随之增加。其原因与(1)类同。

参考文献

1 E·H·罗曼诺娃[前苏].基本气候要素的小气候变化.北京:科学出版社,1981

2 么枕生.黄土高原小气候.北京:科学出版社,1959

3 傅抱璞.山地气候.北京:科学出版社,1983

4 陈国良.黄土高原的农业气候资源与合理利用.全国农业气候资源利用与评价文集,福建科技出版社,1983

5 穆兴民,陈国良等.宁南黄土丘陵地土壤水分分布与运行特征.中科院水利部西北水土保持研究所集刊,1992,12月.