

黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用方式坡面土壤水分特性研究

白一茹, 邵明安*

(西北农林科技大学资源环境学院, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为分析不同土地利用方式下坡面土壤水分特性的差异和规律, 对黄土高原水蚀风蚀交错带典型坡面上农地、林地和草地的土壤水分特性进行了分析。结果表明: (1) 苜蓿地土壤的持水能力和供水能力最强, 其次是杏树林和长芒草地, 谷子地最差; (2) 通过土壤水分有效性分析发现, 水蚀风蚀交错带田间持水量相当于 -0.2×10^5 Pa 土壤基质势时的土壤含水量, 永久凋萎点则低于 -2.0×10^6 Pa 土壤基质势对应的土壤含水量; (3) 苜蓿地有效水含量最高, 谷子地有效水含量最低, 而且苜蓿地土壤有效水含量的提高主要是提高了迟效水部分; (4) 对不同土地利用方式下的土壤比水容量变化曲线研究表明, 土壤比水容量在田间持水量附近随土壤含水量的降低减小的很快, 而当土壤水分降低到田间持水量的 50%~60% 以下时, 土壤比水容量基本不变。

关键词: 水蚀风蚀交错带; 土地利用方式; 比水容量; 土壤水分有效性

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)01-0122-08

黄土高原水蚀风蚀交错带气候变化剧烈, 生态环境脆弱, 降雨量低, 土壤水分严重缺乏, 形成了农牧交错和水蚀风蚀交错的特殊地区^[1], 土壤水分成为影响作物产量和林草成活率的主要限制因素之一。研究土壤水分持水供水特性和土壤水分有效性有利于退耕植被的选择及林草成活率。许多学者对土壤水分特性进行了大量研究, 刘恩斌等^[2]对黄土高原主要土壤持水性能的研究结果表明黄土高原几种土壤中, 持水性及抗旱力以重壤土最强, 中壤土次之, 轻壤土较差, 沙壤土最差; 刘胜等^[3]通过研究黄土高原青海地区退耕还林后形成的云杉人工林地的土壤水分特性发现表土的供水能力比下层和中层的供水能力要强; 孙中峰等^[4]通过研究晋西黄土区坡面林地土壤持水性能, 发现在相同土壤基质势下, 比水容量由大到小依次为刺槐×侧柏林地、刺槐、油松、油松×刺槐和侧柏。已有的土壤水分特性研究大都是不同质地的土壤或是不同种类林地的水分特性研究^[4~9], 而对农地、林地和草地三者的土壤水分特性的差异和规律则研究较少。

本文通过不同土地利用方式下土壤水分特征曲线和比水容量, 研究了黄土高原水蚀风蚀交错带草地、农地和林地土壤的持水能力和供水能力, 并对该地区典型坡面土壤水分有效性进行初步分析, 了解

了不同土地利用方式下土壤水分有效性的水平。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕北神木县以西 14 km 处的六道沟小流域, 属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心, 年平均降水量 437.4 mm, 年内、年际变化大, 7~8 月份降水量最多, 约占全年降水量的 50% 以上。主要的土壤类型为绵沙土、硬黄土、红土以及在沙地发育起来的风沙土。本文在这一区域选取一个典型的坡面, 山体走向为东西方向, 坡长 350 m, 坡顶海拔 1 256 m, 整个坡面除了距坡顶 110 m 左右较陡外, 其它坡度为 20° 左右, 坡顶为长芒草地, 坡面上端 110 m 内为已退耕 20 a 的老苜蓿地; 坡中是退耕 4 年的杏树林, 伴有草木樨—黄芪—乌里胡枝子建群种; 坡下大部分为农田和少部分已退耕 4 年的杏树林。在试验坡面由上至下依次取四个 2 m 深的剖面, 剖面质地基本均一, 其中谷子地的土层伴有红胶泥和料浆石, 因而导致容重比其它土地利用方式下的稍大。坡长依次为 0 m、70 m、150 m、330 m, 对应的作物依次为长芒草、苜蓿、杏树和谷子, 包括农地、林地和草地三种土地利用方式。

收稿日期: 2008-06-05
基金项目: 教育部长江学者创新团队项目 (IRT0749); 西北农林科技大学学科带头人支持计划 (土壤学)
作者简介: 白一茹 (1984—), 女, 陕西渭南人, 在读硕士生, 主要研究方向为土壤水分有效性。E-mail: yr0823@163.com。
通讯作者: 邵明安, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤物理研究。E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn。

表 1 试验地土壤基本物理性质

Table 1 The basic soil physical properties in the slope

植被类型 Type of vegetation	容重 Bulk density (g/cm ³)	砂粒含量 Sand content (%)	粉粒含量 Silt content (%)	粘粒含量 Clay content (%)	田间持水量 Field capacity (%)	永久凋萎点 Permanent wilting point (%)	饱和含水量 Saturation moisture content (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)
谷子 Millet	1.61	76.06	19.82	4.12	14.27	5.04	25.70	37.93
杏树 Almond	1.49	72.83	21.57	5.60	17.49	6.24	28.46	42.66
苜蓿 Alfalfa	1.58	71.18	23.15	5.67	17.83	7.69	26.18	40.37
长芒草 Stipa bungeana	1.53	75.17	20.06	4.77	14.58	6.48	27.20	41.84

注:由于试验地剖面质地基本均一,表中的数值均为剖面上的均值。

Note: As the texture of the slope profile is homogeneous, the numerical values in the table are all the average values of the profile.

1.2 研究方法

1.2.1 土壤水分特征曲线的测定 在试验地选取的剖面上用环刀每 20 cm 取其原状土,重复 3 次,浸水饱和,测其饱和质量含水量;用日本 HITACHI 公司生产的 CR21G 离心机测定土壤水分特征曲线,通过设置离心机的转速以确定相对应的吸力,待测试土样达到平衡后,测定该吸力下的质量含水量,离心力增加,依次测定不同吸力下的质量含水量,即可得到土壤水分特征曲线。测定的吸力范围为 10~1 000 kPa。

1.2.2 土壤物理性质测定 采集试验地的原装土及扰动土(风干后过 1 mm 筛),容重、饱和含水量和毛管孔隙度用环刀法测定;土壤机械组成用 MS2000 型激光粒度仪测定;田间持水量用双环刀法测定;永久凋萎点用栽培法测定^[10]。

1.2.3 比水容量和土壤水分有效性 土壤水分特征曲线是研究土壤持水特性的重要依据之一,揭示了土壤水的能量指标(基质吸力)与数量指标(土壤含水量)之间的内在关系,有研究表明 Gardner 的幂函数经验公式 $\theta = AS^{-B}$ 对黄土高原几种典型土壤的持水曲线都适用^[2]。本研究选择 Gardner 的幂函数模型拟合不同土地利用方式下的土壤水分特征曲线,拟合结果见表 2。相关系数大于 0.98(表 2),说明 Gardner 的幂函数模型对本试验区的土壤水分特征曲线有很好的模拟性。

土壤比水容量表示在土壤基质势或土壤水吸力某一变化范围内,土壤所能释放或储存以供植物利用的水量,它在评价土壤水分有效性程度方面具有极重要意义,说明土壤水分的有效性和供水容量的大小,是评价土壤耐旱性的重要指标^[9]。比水容量 $C(\theta)$ 在数值上等于土壤水分特征曲线的斜率,即含水量对基质势的导数。表示为:

$$C(\theta) = d\theta/d\Psi_m = -d\theta/dS \tag{1}$$

式中: S 是土壤水吸力, $S = -\Psi_m$ 。

根据(1) 式由乘幂函数 $\theta = AS^{-B}$ 求得得出比水容量:

$$C(\theta) = A \times B \times S^{-(B+1)} \tag{2}$$

式中: $A \times B(\text{cm}^3/10^5\text{Pa} \cdot \text{cm}^3)$ 为土壤水吸力; S 为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时的比水容量, $A \times B$ 值越大,表明土壤的供水性或耐旱性越好。 $B+1$ 表明比水容量随土壤基质势的变化比土壤含水量的变化快。

该文以土壤基质势作为指标,将土壤水的能态和形态相结合,对土壤水分进行有效性分类,进行土壤水分有效性研究。一般造林树木的永久凋萎点可以达到 $-2.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 以下, $-2.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 作为有效水下限,将土壤水分作如下分类: $> -0.3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 为重力水, $-0.3 \times 10^5 \sim -2.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 为有效水,其中 $-0.3 \times 10^5 \sim -1.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 为速效水, $-1.0 \times 10^6 \sim -2.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 为迟效水, $< -2.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 为无效水^[8,9]。

2 结果与分析

2.1 土壤水分特征曲线拟合及比水容量

表 2 是对试验地土壤水分特征曲线的拟合结果,可以看出: 4 种植被下 A 值由大到小为: 苜蓿 0.1407、杏树 0.1128、长芒草 0.1082、谷子 0.0952,说明苜蓿地的持水能力最强,谷子地的持水能力最差。持水能力与粘粒含量、孔隙度等有关,苜蓿地的粘粒含量最高,孔隙度较大,持水能力最强;而谷子地的粘粒含量最低,孔隙度最小,持水能力也最差。同时表 2 给出了 4 种植被 $A \times B$ 的平均值。其值分别为: 苜蓿 0.0255、长芒草 0.0207、杏树 0.0201、谷子 0.0158。 $A \times B$ 值越大,比水容量就越大,土壤供水性越强,土壤水分有效性越好,所以苜蓿地土壤的供水性最好,其次为长芒草和杏树,谷子地土壤供水性最差,而且苜蓿地的 $A \times B$ 值是谷子地的 1.6 倍

多,说明苜蓿地的供水性比谷子地高,土壤水分有效性由大到小为:苜蓿、长芒草、杏树、谷子,由此我们从土地利用方式的角度考虑,可以得出草地的土壤水分有效性最高,其次是林地,农田的土壤水分有效性最低。

根据表 2 还可看出不同深度下土壤水分有效性也有很大差异,谷子地表层 0~20 cm 处的 $A \times B$ 值为 0.0204,土壤水分有效性最大,其后随深度的增加逐渐减小,到了 180~200 cm 深处时为 0.0118,仅为表层 0~20 cm 的 57%。杏树地土壤水分有效性的变化与谷子地则是完全相反,杏树林地表层土壤水分有效性最小,随后呈增加趋势,到了 180~200

cm 深处达到最大值,为 0~20 cm 处的 1.8 倍,而长芒草和苜蓿地的 $A \times B$ 则随深度的增加呈先增加后降低的趋势,其中苜蓿地的 $A \times B$ 在 140 cm 左右达到最大值,长芒草地的 $A \times B$ 在 70 cm 深处达到最大值,造成这些差异的可能原因是根系分布对土壤的结构产生影响,谷子的根系比较浅,主要集中在表层,所以对表层土壤水分利用比较充分,而对深层的水分利用率很低,苜蓿的细根分布随深度先增加后降低,主要分布在 1~2 m 深处^[11],因而就对 1~2 m 深的土壤水分能够充分利用,杏树属于林木,根系分布比较深,主要吸收利用深层的土壤水分。

表 2 不同土地利用方式下的土壤水分特征曲线的拟合参数
Table 2 The parameters of soil water characteristic curve of different land uses

土层 Layer of soil(cm)	植被 Vegetation	参数 Parameters				植被 Vegetation	参数 Parameters			
		A	B	$A \times B$	R^2		A	B	$A \times B$	R^2
0~20	谷子 Millet	0.1177	0.1732	0.0204	0.991	杏树 Almond	0.0666	0.1904	0.0127	0.988
20~40		0.0955	0.1719	0.0164	0.991		0.1030	0.1552	0.0160	0.992
40~60		0.1014	0.1507	0.0153	0.991		0.1193	0.1758	0.0210	0.994
60~80		0.1505	0.1215	0.0183	0.989		0.1214	0.1790	0.0217	0.993
80~100		0.0933	0.1628	0.0152	0.986		0.1151	0.1580	0.0182	0.994
100~120		0.0834	0.1761	0.0147	0.904		0.1105	0.1900	0.0210	0.984
120~140		0.0793	0.1901	0.0151	0.984		0.1128	0.1959	0.0221	0.988
140~160		0.0782	0.1742	0.0136	0.989		0.1307	0.1734	0.0227	0.991
160~180		0.0828	0.1745	0.0144	0.987		0.1249	0.1783	0.0223	0.986
180~200	苜蓿 Alfalfa	0.0698	0.1695	0.0118	0.988	长芒草 Stipa bungeana	0.1241	0.1894	0.0235	0.988
平均值 Average		0.0952	0.1665	0.0158	0.980		0.1128	0.1786	0.0201	0.990
变异系数 CV (%)		24.97	11.23	15.50	—		16.05	7.68	17.10	—
0~20		0.0999	0.1500	0.0150	0.988		0.1101	0.1947	0.0214	0.984
20~40		0.1126	0.1520	0.0171	0.986		0.1058	0.1937	0.0205	0.990
40~60		0.1194	0.1727	0.0206	0.990		0.1197	0.2046	0.0245	0.976
60~80		0.1583	0.1900	0.0301	0.986		0.1411	0.1906	0.0269	0.990
80~100		0.1640	0.1933	0.0317	0.993		0.1363	0.1935	0.0264	0.989
100~120		0.1563	0.1919	0.0300	0.990		0.1185	0.1890	0.0224	0.992
120~140	杏树 Almond	0.1628	0.1976	0.0322	0.989	苜蓿 Alfalfa	0.1024	0.1906	0.0195	0.993
140~160		0.1497	0.1865	0.0279	0.991		0.0830	0.1916	0.0159	0.994
160~180		0.1438	0.1747	0.0251	0.988		0.0752	0.1730	0.0130	0.992
平均值 Average		0.1407	0.1788	0.0255	0.989		0.1082	0.1911	0.0207	0.989
变异系数 CV (%)	长芒草 Stipa bungeana	17.00	9.93	25.37	—	苜蓿 Alfalfa	19.88	4.30	20.60	—
0~20		0.0999	0.1500	0.0150	0.988		0.1101	0.1947	0.0214	0.984
20~40		0.1126	0.1520	0.0171	0.986		0.1058	0.1937	0.0205	0.990
40~60		0.1194	0.1727	0.0206	0.990		0.1197	0.2046	0.0245	0.976
60~80	苜蓿 Alfalfa	0.1583	0.1900	0.0301	0.986	长芒草 Stipa bungeana	0.1411	0.1906	0.0269	0.990
80~100		0.1640	0.1933	0.0317	0.993		0.1363	0.1935	0.0264	0.989
100~120		0.1563	0.1919	0.0300	0.990		0.1185	0.1890	0.0224	0.992
120~140		0.1628	0.1976	0.0322	0.989		0.1024	0.1906	0.0195	0.993
140~160	杏树 Almond	0.1497	0.1865	0.0279	0.991	苜蓿 Alfalfa	0.0830	0.1916	0.0159	0.994
160~180		0.1438	0.1747	0.0251	0.988		0.0752	0.1730	0.0130	0.992
平均值 Average		0.1407	0.1788	0.0255	0.989		0.1082	0.1911	0.0207	0.989
变异系数 CV (%)		17.00	9.93	25.37	—		19.88	4.30	20.60	—

表 3 分析了 4 种植被的土壤比水容量与土壤基质势之间的关系。土壤的比水容量是土壤抗旱性的指标,比水容量 10⁻²级的出现标志着植物从土壤中吸收的水量显著减少,水分运动显著减慢,可以根据比水容量 10⁻²级出现的吸力值来评价土壤的释水能力和抗旱能力。根据表 3 可以看出,当土壤比水

容量达到 10⁻²级时,谷子地的土壤基质势为-0.2×10⁵ Pa,而杏树林、苜蓿地和长芒草地的土壤基质势为-0.4×10⁵ Pa,说明农田的供水能力差于林地和草地。而且在相同土壤基质势和同一深度下,苜蓿地和长芒草地的比水容量较大,谷子地的比水容量较小,这也说明农田的土壤水分有效性差于草地。

表 3 不同土地利用方式下的比水容量[mL/(10⁵Pa·g)]
Table 3 The specific water capacity of different land uses

植被 Vegetation	土层(cm) Layer of soil	土壤基质势 Soil matrix potential (−10 ⁵ Pa)								
		0.1	0.2	0.4	0.8	1.0	2.0	4.0	8.0	10.0
谷子 Millet	0~20	3.04×10 ^{−1}	1.35×10 ^{−1}	5.97×10 ^{−2}	2.65×10 ^{−2}	2.04×10 ^{−2}	9.04×10 ^{−3}	4.01×10 ^{−3}	1.78×10 ^{−3}	1.37×10 ^{−3}
	40~60	2.16×10 ^{−1}	9.74×10 ^{−2}	4.39×10 ^{−2}	1.98×10 ^{−2}	1.53×10 ^{−2}	6.88×10 ^{−3}	3.10×10 ^{−3}	1.40×10 ^{−3}	1.08×10 ^{−3}
	80~100	2.21×10 ^{−1}	9.87×10 ^{−2}	4.41×10 ^{−2}	1.97×10 ^{−2}	1.52×10 ^{−2}	6.78×10 ^{−3}	3.03×10 ^{−3}	1.35×10 ^{−3}	1.04×10 ^{−3}
	120~140	2.34×10 ^{−1}	1.02×10 ^{−1}	4.49×10 ^{−2}	1.97×10 ^{−2}	1.51×10 ^{−2}	6.61×10 ^{−3}	2.90×10 ^{−3}	1.27×10 ^{−3}	9.73×10 ^{−4}
	160~180	2.16×10 ^{−1}	9.56×10 ^{−2}	4.24×10 ^{−2}	1.88×10 ^{−2}	1.44×10 ^{−2}	6.40×10 ^{−3}	2.84×10 ^{−3}	1.26×10 ^{−3}	9.66×10 ^{−4}
杏树 Almond	0~20	1.97×10 ^{−1}	8.61×10 ^{−2}	3.77×10 ^{−2}	1.65×10 ^{−2}	1.27×10 ^{−2}	5.56×10 ^{−3}	2.43×10 ^{−3}	1.07×10 ^{−3}	8.18×10 ^{−4}
	40~60	3.14×10 ^{−1}	1.39×10 ^{−1}	6.16×10 ^{−2}	2.73×10 ^{−2}	2.10×10 ^{−2}	9.28×10 ^{−3}	4.11×10 ^{−3}	1.82×10 ^{−3}	1.40×10 ^{−3}
	80~100	2.62×10 ^{−1}	1.17×10 ^{−1}	5.26×10 ^{−2}	2.36×10 ^{−2}	1.82×10 ^{−2}	8.15×10 ^{−3}	3.65×10 ^{−3}	1.64×10 ^{−3}	1.26×10 ^{−3}
	120~140	3.47×10 ^{−1}	1.51×10 ^{−1}	6.61×10 ^{−2}	2.88×10 ^{−2}	2.21×10 ^{−2}	9.64×10 ^{−3}	4.21×10 ^{−3}	1.84×10 ^{−3}	1.41×10 ^{−3}
	160~180	3.66×10 ^{−1}	1.60×10 ^{−1}	7.04×10 ^{−2}	3.08×10 ^{−2}	2.37×10 ^{−2}	1.04×10 ^{−2}	4.55×10 ^{−3}	1.99×10 ^{−3}	1.53×10 ^{−3}
苜蓿 Alfalfa	0~20	2.12×10 ^{−1}	9.54×10 ^{−2}	4.30×10 ^{−2}	1.94×10 ^{−2}	1.50×10 ^{−2}	6.75×10 ^{−3}	3.04×10 ^{−3}	1.37×10 ^{−3}	1.06×10 ^{−3}
	40~60	3.07×10 ^{−1}	1.36×10 ^{−1}	6.04×10 ^{−2}	2.68×10 ^{−2}	2.06×10 ^{−2}	9.15×10 ^{−3}	4.06×10 ^{−3}	1.80×10 ^{−3}	1.39×10 ^{−3}
	80~100	4.95×10 ^{−1}	2.16×10 ^{−1}	9.46×10 ^{−2}	4.14×10 ^{−2}	3.17×10 ^{−2}	1.39×10 ^{−2}	6.06×10 ^{−3}	2.65×10 ^{−3}	2.03×10 ^{−3}
	120~140	5.07×10 ^{−1}	2.21×10 ^{−1}	9.64×10 ^{−2}	4.20×10 ^{−2}	3.22×10 ^{−2}	1.40×10 ^{−2}	6.11×10 ^{−3}	2.67×10 ^{−3}	2.04×10 ^{−3}
	160~180	3.76×10 ^{−1}	1.66×10 ^{−1}	7.37×10 ^{−2}	3.26×10 ^{−2}	2.51×10 ^{−2}	1.11×10 ^{−2}	4.93×10 ^{−3}	2.18×10 ^{−3}	1.68×10 ^{−3}
长芒草 Stipa bungeana	0~20	3.36×10 ^{−1}	1.47×10 ^{−1}	6.41×10 ^{−2}	2.80×10 ^{−2}	2.14×10 ^{−2}	9.37×10 ^{−3}	4.09×10 ^{−3}	1.79×10 ^{−3}	1.37×10 ^{−3}
	40~60	3.92×10 ^{−1}	1.70×10 ^{−1}	7.39×10 ^{−2}	3.20×10 ^{−2}	2.45×10 ^{−2}	1.06×10 ^{−2}	4.61×10 ^{−3}	2.00×10 ^{−3}	1.53×10 ^{−3}
	80~100	4.12×10 ^{−1}	1.80×10 ^{−1}	7.87×10 ^{−2}	3.44×10 ^{−2}	2.64×10 ^{−2}	1.15×10 ^{−2}	5.04×10 ^{−3}	3.11×10 ^{−3}	1.69×10 ^{−3}
	120~140	3.03×10 ^{−1}	1.33×10 ^{−1}	5.81×10 ^{−2}	2.54×10 ^{−2}	1.95×10 ^{−2}	8.55×10 ^{−3}	3.75×10 ^{−3}	1.64×10 ^{−3}	1.26×10 ^{−3}
	160~180	1.94×10 ^{−1}	8.59×10 ^{−2}	3.81×10 ^{−2}	1.69×10 ^{−2}	1.30×10 ^{−2}	5.77×10 ^{−3}	2.56×10 ^{−3}	1.14×10 ^{−3}	8.74×10 ^{−4}

2.2 土壤水分有效性分类

土壤所含水分可分为重力水、有效水(速效水+迟效水)和无效水。一般经典土壤物理学认为土壤水分有效性是指田间持水量到永久凋萎点之间的土壤水分被植物吸收利用的程度,是一动态变化过程,田间持水量是土壤水分对作物有效的最高含水量,永久凋萎点是土壤水分对作物有效的下限^[13]。一般将田间持水量作为重力水与有效水的分界点。根据双环刀法测定的田间持水量反查土壤水分特征曲线模型,本试验样地土壤的田间持水量相当于一0.2×10⁵ Pa 土壤基质势时的土壤含水量。一般造林树木的永久凋萎点可以达到−2.0×10⁶ Pa 以下,以此作为有效水下限。在有效水范围内,随着土壤基质势下降,即含水量降低,植物根系吸收水分的难度增加。因树木的暂时凋萎点可达−1.0×10⁶ Pa 以下,因此可将−1.0×10⁶ Pa 作为迟效水上限。由此可对试验地土壤水分作如下分类: >−0.2×10⁵ Pa 为重力水, −0.2×10⁵~−2.0×10⁶ Pa 为有效水,其中−0.2×10⁵~−1.0×10⁶ Pa 为速效水, −1.0×10⁶~−2.0×10⁶ Pa 为迟效水, <−2.0×10⁶ Pa 为无效水。

与有关研究结果有明显差异。首先各种水分含量均远小于其他研究者所得出的数值,其中速效水的上限甚至小 3 倍以上,通过分析还发现田间持水量相当于一0.2×10⁵ Pa 土壤基质势时的土壤含水量,而黄土高原的其他地区多为−0.3×10⁵ Pa 土壤基质势时的土壤含水量,通过比较栽培法测得的永久凋萎点与−2.0×10⁶ Pa 土壤基质势时的土壤含水量发现, −2.0×10⁶ Pa 土壤基质势时的土壤含水量比实际测定的永久凋萎点高出 20% 以上,这与黄土高原的其他地区也有所不同^[2, 12]。这说明黄土高原水蚀风蚀交错地区的土壤有效水的上限所对应的土壤基质势比其他黄土区要高,而下限则比其他地区的要低。造成这一结果的原因主要是黄土高原水蚀风蚀交错地区长期缺乏水分,蒸散量大,干旱严重,难以满足植物生长发育的需求,植物为了自身生长不断地适应该地区特殊的自然环境,根系变得发达,密度大,分布广,提高了植物的吸水能力,使作物能够充分利用有限的水资源。谷子地、杏树地、苜蓿地、长芒草地土壤有效水的平均含量分别为: 6.51%、8.41%、8.99%、8.33%,即苜蓿地的有效水含量最高,谷子地的有效水含量最低,这说明苜蓿地的土壤水分可被植物吸收利用的范围最宽,对水分

利用的效率最高,而谷子只对很窄的一段土壤水分能够吸收利用,也就是说苜蓿地的土壤水分有效性最大,谷子地的土壤水分有效性最小。若以 $-0.2\times 10^5\text{ Pa}$ 土壤基质势时的土壤含水量作为田间持水量, $-2.0\times 10^6\text{ Pa}$ 土壤基质势时的土壤含水量作为永久凋萎点,可以看出谷子地、杏树地、苜蓿地、长芒草地的田间持水量依次为:13.38%、16.3%、18.03%、15.43%,永久凋萎点依次为:6.87%、7.89%、9.04%、7.10%,其中苜蓿地的田间持水量

比谷子地增加了4.65,而永久凋萎点只增加了2.17,也就是说苜蓿地的田间持水量和凋萎含水量均比谷子地高,但是田间持水量增加的更多,因而导致苜蓿地的有效水含量比谷子地的高。通过分析还发现,谷子地、杏树地、苜蓿地、长芒草地的迟效水含量分别占其有效水含量的2.30%、3.45%、6.56%和4.80%,这说明苜蓿地土壤水分有效性的提高主要是提高了迟效水部分。

表 4 不同土地利用方式下的土壤水分有效性分类
Table 4 The classification of soil water availability of different land uses

土层 Layer of soil (cm)	植被 Vege- tation	重力水 Gravity water > $-0.2\times 10^5\text{ Pa}$	有效水($\times 10^5\text{ Pa}$) Available water		无效水 Unavailable water < $-20\times 10^5\text{ Pa}$	植被 Vege- tation	重力水 Gravity water > $-0.2\times 10^5\text{ Pa}$	有效水($\times 10^5\text{ Pa}$) Available water		无效水 Unavailable water < $-20\times 10^5\text{ Pa}$
			速效水 Rapidly- availabl water	迟效水 Slowly- available water				速效水 Rapidly- availabl water	迟效水 Slowly- available water	
			$-0.2\sim-10$	$-10\sim-20$				$-0.2\sim-10$	$-10\sim-20$	
0~20	谷子 Millet	17.02	17.02~8.49	8.49~8.30	8.30	杏树 Almond	14.89	14.89~7.11	7.11~6.86	6.86
20~40		14.19	14.19~6.98	6.98~6.85	6.85		14.4	14.4~7.66	7.66~7.48	7.48
40~60		13.73	13.73~7.60	7.69~7.43	7.43		17.65	17.65~8.47	8.47~8.21	8.21
60~80		19.69	19.69~11.87	11.8~11.6	11.65		17.33	17.33~8.52	8.52~8.22	8.22
80~100		13.76	13.76~6.93	6.93~6.81	6.81		16.43	16.43~8.44	8.44~8.21	8.21
100~120		11.45	11.45~5.92	5.92~5.74	5.74		15.18	15.18~7.58	7.58~7.27	7.27
120~140		11.23	11.23~5.69	5.69~5.58	5.58		15.73	15.73~7.51	7.51~7.12	7.12
140~160		10.85	10.85~5.54	5.54~5.36	5.36		18.05	18.05~9.29	9.29~8.97	8.97
160~180		11.76	11.76~5.99	5.99~5.86	5.86		16.33	16.33~8.73	8.73~8.34	8.34
180~200		10.13	10.13~5.17	5.17~5.09	5.09		17.00	17.00~8.55	8.55~8.22	8.22
平均值 Average		13.38	13.38~7.02	7.02~6.87	6.87		16.30	16.30~8.18	8.18~7.89	7.89
0~20	苜蓿 Alfalfa	13.64	13.64~7.40	7.40~7.19	7.19	长芒草 Stipa bungeana	15.21	15.21~7.49	7.49~7.18	7.18
20~40		16.28	16.28~8.40	8.40~8.23	8.23		15.63	15.63~7.29	7.29~7.08	7.08
40~60		15.82	15.82~8.30	8.30~8.05	8.05		17.99	17.99~7.95	7.95~7.60	7.60
60~80		19.93	19.93~10.61	10.60~9.90	9.90		18.00	18.00~9.36	9.36~8.59	8.59
80~100		20.69	20.69~10.95	10.95~10.30	10.3		17.97	17.97~9.35	9.35~8.55	8.55
100~120		19.15	19.15~10.28	10.28~9.28	9.28		16.47	16.47~8.07	8.07~7.71	7.71
120~140		20.91	20.91~10.73	10.73~9.99	9.99		14.07	14.07~6.88	6.88~6.47	6.47
140~160		18.39	18.39~10.06	10.06~9.23	9.23		12.30	12.30~5.63	5.63~5.39	5.39
160~180		17.48	17.48~9.94	9.94~9.22	9.22		11.20	11.20~5.44	5.44~5.33	5.33
平均值 Average		18.03	18.03~9.63	9.63~9.04	9.04		15.43	15.43~7.50	7.50~7.10	7.10

图 1 是 4 种植被不同深度下的田间持水量、凋萎含水量及有效水含量,可以看出不同植被的有效水含量随土壤深度的变化有很大差异。苜蓿地的有效水含量随深度的增加呈先增加后降低的趋势,并在 130 cm 处达到最大值,即苜蓿地的土壤水分有效性在土壤深度为 130 cm 左右时最大。长芒草地的有效水含量的变化趋势与苜蓿地基本一致,在 50 cm 深处达到最大值。谷子地的有效水含量在土壤表层最大,并随深度的增加有逐渐减小的趋势。杏

树林地的有效水含量在 50 cm 深处最大,其后随深度呈波动变化,并且随深度的增加略有降低。

2.3 土壤比水容量动态变化曲线

根据公式(2)得出不同吸力下的比水容量,再结合对应的土壤含水量,得出比水容量随土壤质量含水量增加的变化曲线^[14]。通过拟合发现,土壤质量含水量与比水容量之间的相关关系满足 $C(\theta) = a\theta^b + c$,且 R^2 均达到 0.99 以上,这说明二者之间有非常好的相关关系。

由图 2 可以看出,苜蓿地的上层土壤比水容量随土壤含水量的降低变化比较缓慢,而深层土壤比水容量在田间持水量附近随土壤含水量的降低减小的很快,而当土壤水分降低到 12% 以下,也就相当于田间持水量的 60% 以下时,土壤比水容量基本不变,也就是说当土壤水分降低到 12% 以下时,土壤对苜蓿的供水能力是不变的。杏树林地也是深层土壤比水容量变化比上层变化较为剧烈,但是远没有苜蓿地的差异明显,当土壤水分降低到 9% 以下时,土壤对作物的供水能力保持不变。而长芒草地则是

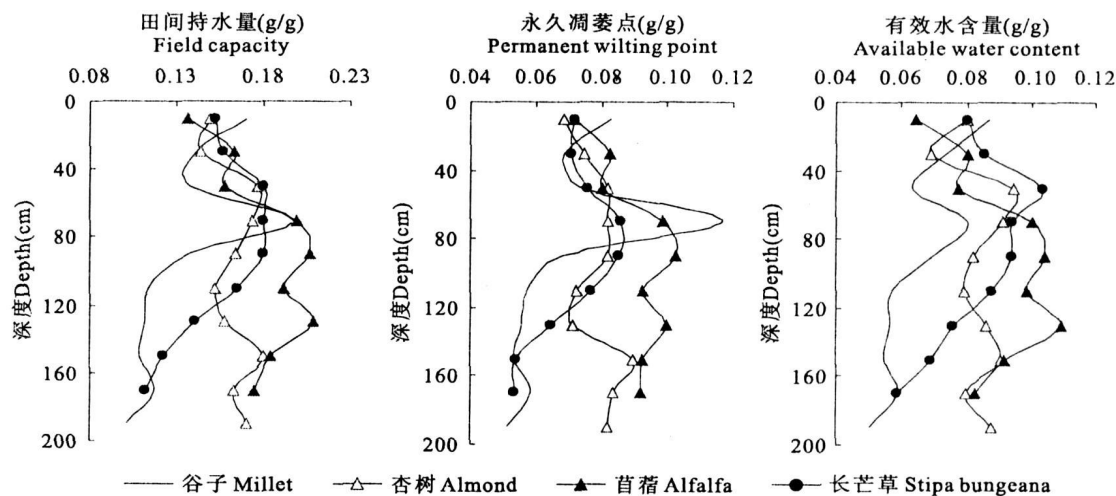


图 1 不同土地利用方式下的土壤田间持水量、永久凋萎点及有效水含量

Fig.1 Field capacity, permanent wilting point and available water content of different land uses

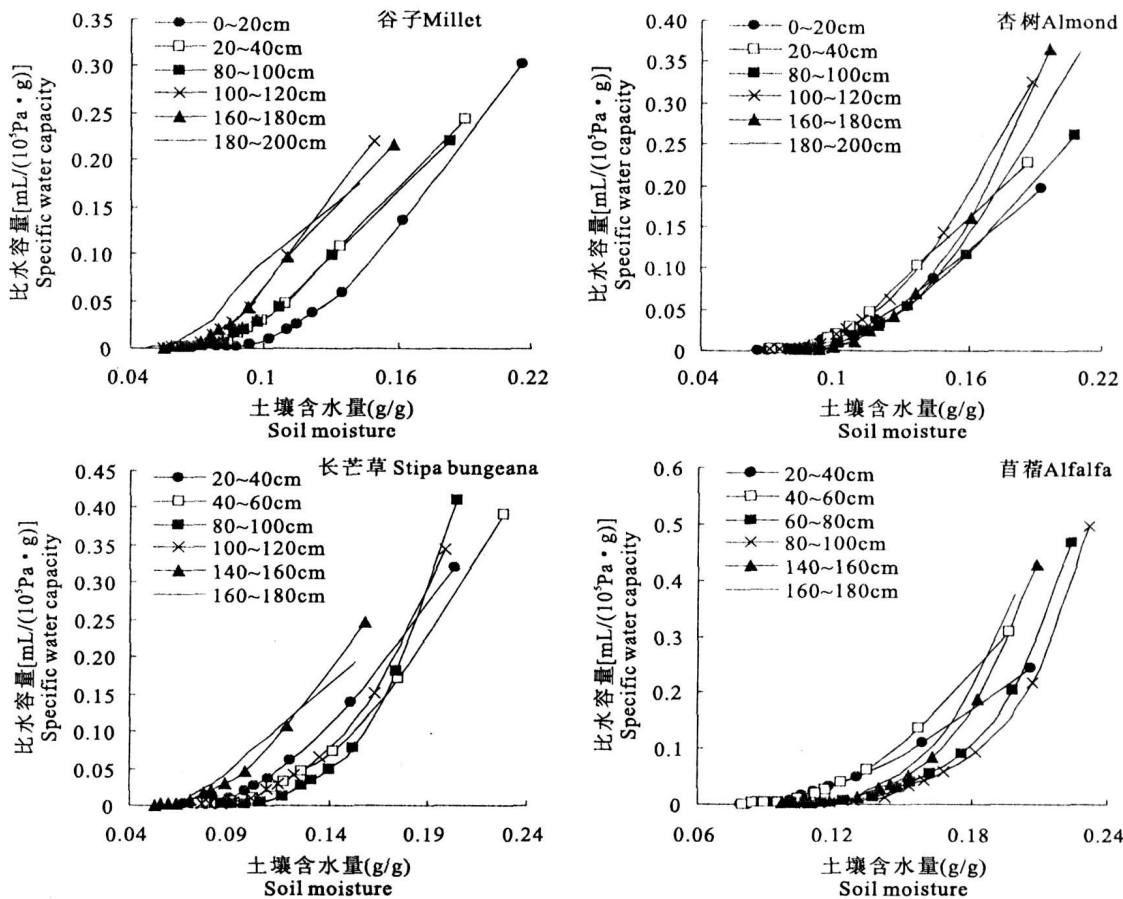


图 2 不同深度区间的土壤比水容量随土壤含水量的变化

Fig.2 The change of the specific water capacity with soil moisture in different depth intervals

100 cm 深处的土壤比水容量随土壤含水量的降低减小得比较快,表层和深层减小的缓慢,当中层和上层的土壤水分降低到 10% 以下时,比水容量基本不变,而深层土壤水分降低到 6% 以下时,土壤比水容量才基本不变。谷子地不同深度的土壤比水容量变化趋势基本类似,随着土壤水分的降低逐渐减小,上层土壤比水容量在土壤水分降低到 10% 以下时基本不变,深层土壤比水容量在土壤水分降低到 5% 以下时才基本保持不变。

根据图 3 可以看出,4 种不同植被下的表层土壤比水容量变化曲线随土壤含水量的变化区别不大,当土壤含水量降低到 9% 以下时,土壤对作物的供水能力基本保持不变,但是到了土壤中层可明显看出谷子地的土壤比水容量随土壤含水量的降低变化缓慢,苜蓿地的土壤比水容量变化最为剧烈,杏树

林和长芒草地的变化规律比较相似,而到了 160 cm 的深度时,苜蓿地和杏树地的土壤比水容量变化规律类似,长芒草和谷子地的类似,苜蓿地和杏树地的土壤比水容量在田间持水量附近时比长芒草地和谷子地降低的更为剧烈。

通过研究土壤比水容量动态变化曲线,发现土壤比水容量在田间持水量附近随土壤含水量的降低减小的很快,而当土壤水分降低到田间持水量的 50%~60% 以下时,土壤比水容量基本不变,比水容量可以用来说明土壤水分有效性的,而且与邵明安等^[15]通过研究土壤含水量与根系吸水速率之间的关系,得出土壤水分有效性的变化规律是一致的,说明用土壤含水量与比水容量之间的关系衡量土壤水分有效性的变化规律是可行的。

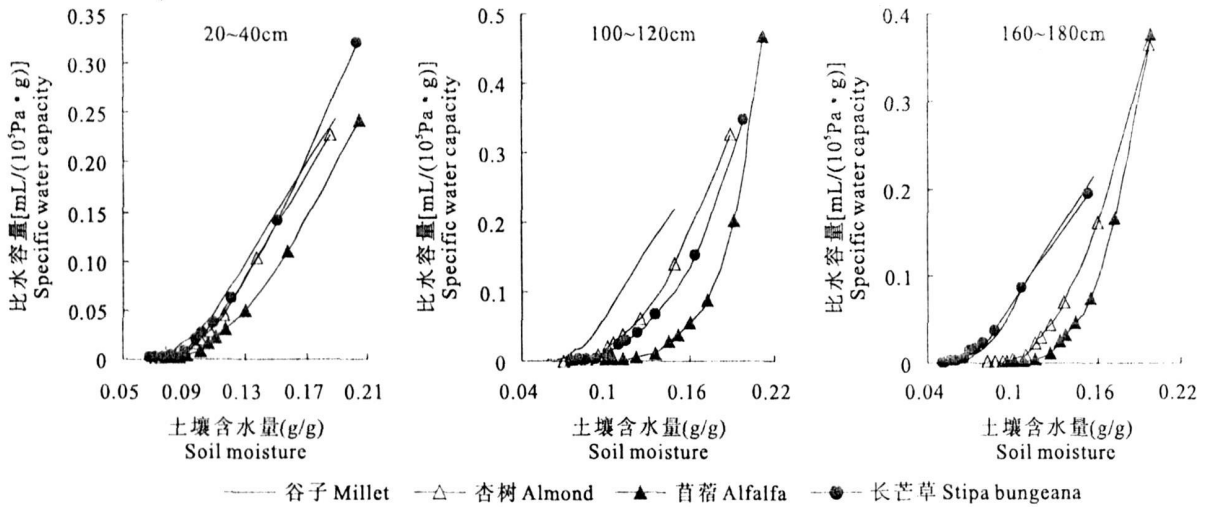


图 3 三个相同深度区间的土壤比水容量随土壤含水量的变化

Fig. 3 The change of the specific water capacity with soil moisture in three intervals with the same depth

3 结 论

通过测定和分析,本研究得到如下初步结论:

- 1) 通过拟合土壤水分特征曲线得出,苜蓿地土壤的持水性和供水性最好,其次为长芒草和杏树,谷子地土壤的持水性和供水性最差。
- 2) 黄土高原水蚀风蚀交错带的有效水的上限,即田间持水量相当于 -0.2×10^5 Pa 土壤基质势时的土壤含水量,有效水的下限,即永久凋萎点则低于 -2.0×10^6 Pa 土壤基质势对应的土壤含水量,这与黄土高原的其它地区不同。
- 3) 苜蓿地的有效水含量最高,谷子地的有效水含量最低,这说明苜蓿地的土壤水分可被植物吸收

利用的范围最宽,对水分利用的效率最高,而谷子只对很窄的一段土壤水分能够吸收利用,也就是说苜蓿地的土壤水分有效性最大,谷子地的土壤水分有效性最小,而且苜蓿地的土壤水分有效性的提高主要是提高了迟效水的部分。

4) 通过拟合比水容量随土壤含水量的变化曲线,发现土壤质量含水量与比水容量之间的相关关系满足 $C(\theta) = a\theta^b + c$,且 R^2 均达到 0.99 以上,土壤比水容量在田间持水量附近随土壤含水量的降低减小的很快,而当土壤水分降低到田间持水量的 50%~60% 以下时,土壤比水容量基本不变,而且用土壤含水量与比水容量之间的关系衡量土壤水分有效性规律是可行的。

参 考 文 献:

[1] 唐克丽,侯庆春,王斌科,等.水蚀风蚀交错带和神木试区环境背景及整治方向[J].中科院水土保持研究所集刊,1993,18(2):2—8.

[2] 刘恩斌,董水丽.黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[J].水土保持通报,1997,17(7):20—26.

[3] 刘 胜,贺康宁,常国梁.黄土高原寒区青海云杉人工林地土壤水分物理特性研究[J].西部林业科学,2005,34(3):25—29.

[4] 孙中峰,张学培,刘卉芳,等.晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究[J].干旱地区农业研究,2004,21(4):333—337.

[5] 袁东海,李道林,何 方,等.几种不同类型粘盘黄褐土水分特性的研究[J].安徽农业大学学报,1999,26(2):200—204.

[6] 沈思渊,席承藩.淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系[J].土壤学报,1990,27(1):34—41.

[7] 陈志雄,汪仁真.中国几种土壤的持水性质[J].土壤学报,1979,16(3):277—281.

[8] 王孟本,柴宝峰,李洪建.黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J].林业科学,1999,35(2):7—14.

[9] 吴文强,李吉跃,张志明.北京西山地区人工林土壤水分特性的研究[J].北京林业大学学报,2002,24(4):51—55.

[10] 陈传军.土壤凋萎湿度试验测定的技术方法[J].四川气象,2006,(1):30—31.

[11] 成向荣,黄明斌,邵明安.神木水蚀风蚀交错带主要人工植物细根垂直分布研究[J].西北植物学报,2007,27(2):321—327.

[12] 李笑吟,毕华兴,张建军,等.晋西黄土区土壤水分有效性研究[J].水土保持研究,2006,13(5):205—208.

[13] 郭庆荣,张秉刚.土壤水分有效性研究综述[J].热带亚热带土壤科学,1995,4(2):119—124.

[14] 嵇庆才.江苏地区土壤持水性及水分有效性研究[M].扬州:扬州大学,2006.

[15] 邵明安,杨文治,李玉山.黄土区土壤水分有效性研究[J].水利学报,1987,8:38—44.

Soil water properties in a slope of different land use in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau

BAI Yi-ru, SHAO Ming-an *

(Northwest A & F University, College of Resources and Environment, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Different land use has an important effect on soil moisture and soil quality. In order to describe the differences and features of soil water characteristics on a slope-land under different land uses, a research on soil water characteristics of farmland, woodland and grassland was carried out in the Wind-water Erosion Criss-cross region. The results showed that: (1) the capacity of soil water retention and supply of alfalfas was the best, then almonds, and then stipa bungeana, and the capacity of millets was the worst; (2) in the region the field capacities (FC) corresponded to soil moisture content with soil matrix potential of -0.2×10^5 Pa, the permanent wilting points (PWP) corresponded to soil moisture content with soil matric potential lower than -2.0×10^5 Pa; (3) the available water of alfalfas was the greatest, the available water of millets was the least, and the increase of the available water of alfalfas can be attributed to the increase of slowly available water; (4) the specific water capacity decreased quickly with soil moisture content around FC, while it retained relatively constant in 50%~60% of FC.

Key words: wind-water erosion crisscross region; land use; specific water capacity; soil water availability.