

黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究*

王 锐^{1,3} 刘文兆^{1,2†} 李 志²

(1 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学,陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院研究生院,北京 100039)

PHYSICAL PROPERTIES OF SOILS ALONG A 10 m DEEP SOIL PROFILE IN LOESS TABLELAND

Wang Rui^{1,3} Liu Wenzhao^{1,2†} Li Zhi²

(1 Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

关键词 黄土塬区;深剖面;土壤饱和导水率;土壤质地;土壤水分特征曲线

中图分类号 S152

文献标识码 A

土壤水分是影响黄土高原植被生长和生态环境建设的主要因素。已有对黄土高原土壤的持水性能、水分有效性能与移动性能、黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系等方面的深入研究^[1,2],也有小流域内土壤水分物理性状与地形和利用条件之间关系的具体分析^[3,4]。但是这些工作所涉及的土壤剖面深度多为 2 m 或 3 m,深层土壤水分物理参数研究还少有报道。而对于具有深厚土层的黄土塬区,高产农田与多年生林草地在土壤深层产生了不同程度的干燥化^[5~7],土壤干燥化的深入探讨需要与剖面土壤物理性质相关联。为此,有必要对植物根系伸展范围以至更深层次的土壤质地、容重、水分特征曲线、饱和导水率、田间持水量以及萎蔫湿度等土壤物理性质进行测定,分析其垂直变化及不同层次的相关性,为土壤深层水分生态和运动规律研究提供基础参数。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外测定点位于陕甘交界处的中国科学院长武

农业生态试验站的黄土塬面上。所在区域为典型的黄土高原沟壑区,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 9.1℃。降水年际变异大,多年平均降水量为 584.1 mm,主要集中在 7 月至 9 月,约占全年降水量的 55%以上。塬地主要土壤类型为黑垆土,母质为马兰黄土,非饱和层深厚,地下水埋深 50~80 m。

1.2 研究方法

配合长武农业生态试验站深剖面水分运动观测场建设,开挖直径为 2 m,深 10 m 的竖井,用环刀取原状土样,并采集扰动土作土壤质地等性质分析。土样采集:0~80 cm 土层,每 10 cm 取样;80~120 cm 土层,每 20 cm 取样;120~300 cm 土层,每 30 cm 取样;300 cm 以下土层,每 50 cm 取样。

土壤颗粒组成采用 Mastersizer2000 激光粒度仪(测试范围 0.02~2 000 μm)测定。

饱和导水率采用环刀取原状土恒定水头法室内测定。

土壤水分特征曲线分析:环刀取原状土,浸泡 24 h 水分饱和后,用 CR21G 型高速冷却离心机于

*中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-424-1)、国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD09B09)和中国科学院水利部水土保持研究所知识创新工程领域前沿项目(SW04301)资助

† 通讯作者, E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

作者简介:王锐(1978~),男,山西朔州人,博士研究生,主要从事土壤物理和水文生态研究

收稿日期:2006-11-24;收到修改稿日期:2007-03-13

20 不同转速下离心 10~90 min,使其达到水分平衡,求得相应转速下土壤水重量,同时用游标卡尺测量土样收缩高度以获得收缩后的土样体积,计算不同吸力下土壤的体积含水量,拟合求得土壤水分特征曲线参数值。

2 结果与讨论

2.1 黄土塬区深剖面土壤性状

对于该区塬面土壤剖面(主要在 2 m 母质层以上)曾有描述^[8]。10 m 剖面主要形态特征为:耕作层,深度 0~21 cm,团粒-团块结构,疏松多孔,多根系,表层 0~15 cm 以内,灰棕色;犁底层,21~37 cm,块状、片状结构,土壤紧实,通透性差,浅棕色;古耕层,37~54 cm,块状结构,较紧实,浅黄色,有少量白色钙积物;垆土层,54~100 cm,似棱柱状结构,灰褐色,疏松易碎成粉末,含有较大孔隙和大量石灰假菌丝体;过渡层,100~140 cm,块状结构,较疏松,灰

棕色,有碳酸钙沉淀霜粉;淀积层,140~200 cm,块状结构,较疏松,黄棕色,夹有粒状石灰结核;母质层,2~10 m,马兰黄土,土体较疏松,其中 750 cm 以下土壤较紧实,尤其是 850~900 cm 土层土壤干燥紧实。2~10 m 土体内 <0.5 mm 的微孔隙发育,但仍可见有根孔和蚯蚓活动大孔隙,2~10 m 通体有少量白色钙质粉霜,向下减少。

2.2 黄土塬区土壤质地

土壤剖面颗粒组成测定结果见表 1。根据卡庆斯基土壤质地分级标准,土壤质地大多数为中壤,部分土层为重壤。就 10 m 剖面而言,200~400 cm 母质层与其上层土壤相比,<0.001 mm 和 0.001~0.01 mm 细颗粒含量降低,而 0.01~0.05 mm 和 0.05~0.25 mm 的粗颗粒有所增加。400 cm 以下由于黄土堆积过程的差异,颗粒组成亦有差别,650~700 cm 和 750~850 cm 物理性黏粒含量明显较高,这也是这些土层土体紧实及其较强持水能力而使下层土壤含水量偏低的原因之一。

表 1 黄土塬区 10m 深剖面土壤颗粒组成 (%)

土层 (cm)	<0.001 mm	0.001~0.01 mm	0.01~0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~1 mm	土层 (cm)	<0.001 mm	0.001~0.01 mm	0.01~0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~1 mm
0~10	10.66	29.79	48.19	11.36	0	270~300	9.35	24.80	52.72	12.41	0.18
10~20	12.99	28.97	45.00	10.64	1.02	300~350	9.94	26.56	52.26	10.63	0.26
20~30	11.18	29.17	47.99	9.61	1.65	350~400	9.99	28.35	50.95	9.95	0.11
30~40	9.54	28.85	51.23	10.38	0	400~450	12.60	29.51	48.52	8.38	0.19
40~50	10.01	29.69	51.13	8.42	0.68	450~500	10.25	29.96	50.86	8.61	0.12
50~60	9.02	29.69	51.90	8.52	0.13	500~550	10.34	30.84	50.33	8.49	0
60~70	14.17	32.01	45.83	7.36	0.14	550~600	10.49	28.08	51.03	9.12	0.23
70~80	10.19	30.15	49.89	9.03	0.26	600~650	11.10	30.39	49.85	8.40	0
80~100	9.95	30.10	50.29	9.13	0.19	650~700	10.37	30.61	50.34	7.38	0.08
100~120	10.32	31.00	49.45	8.65	0.13	700~750	16.00	30.11	46.41	7.36	0.14
120~150	12.15	30.17	46.98	9.32	0.36	750~800	15.27	29.80	47.72	5.74	0.13
150~180	10.51	30.00	49.04	10.46	0	800~850	15.30	28.95	47.36	6.95	0.32
180~210	10.55	27.40	50.10	11.71	0.08	850~900	11.70	28.95	50.49	8.33	0.03
210~240	9.45	22.85	53.27	13.59	0.37	900~950	10.41	29.88	51.00	8.70	0
240~270	9.37	24.17	52.32	13.57	0.21	950~1000	9.86	30.42	50.53	8.79	0.07

2.3 黄土塬区土壤容重

10m 剖面土壤容重变化如图 1 所示。在 0~1 m 土层内,土壤容重变化明显,在 1.23~1.43 g cm⁻³ 之间,其中以 20~60 cm 之间的犁底层和古耕层容重最大,均值达 1.40 g cm⁻³;1~2 m 土壤容重较小,层间差异不大,在 1.26~1.29 g cm⁻³ 之间;2 m 以下土

壤容重有所增大,在 1.28~1.32 g cm⁻³ 之间,变化不是很大,但由于土壤发育过程不同,呈现一定的波动。经计算 0~1 m、1~2 m、2~3 m 和 3~10 m 剖面内平均容重分别为 1.34 g cm⁻³、1.28 g cm⁻³、1.31 g cm⁻³ 和 1.30 g cm⁻³。由此可知,在计算土壤贮水量时需主要考虑 1~2 m 范围内容重的变化,2 m 以

下土壤容重值可选用 1.30 g cm^{-3} 。

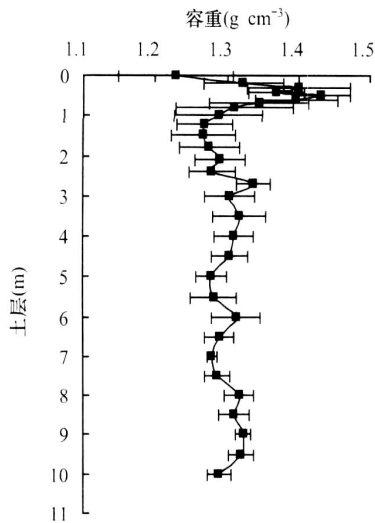


图1 黄土塬区 10 m 深剖面土壤容重变化

2.4 黄土塬区土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线是表示在土壤水非饱和状态下水的能态和数量的关系。土壤水分特征曲线可由幂函数形式的经验方程来拟合：

$$= aS^{-b} \quad (1)$$

式中, S 为土壤体积含水量 (%) ; S 为土壤水吸力 (kPa) ; a, b 为拟合参数。10 m 剖面土壤水分特征曲线拟合结果见表 2。拟合参数 a 值在 2 m 范围内变化较大, 在 38.23 ~ 45.85 之间, 均值为 41.51 ; 2 m 以下变化相对较小, 2 ~ 10 m 范围内 a 的均值为 46.36。参数 b 在 10 m 剖面内变化较大, 其值在 0.097 3 ~ 0.168 2 之间, 均值为 0.130 8。

土壤比水容量 C 表征了土壤水分有效性或供水能力的强弱, 为土壤水分特征曲线的斜率, 即: $C = abS^{-(b+1)}$, 其中 C 为比水容量 (kPa^{-1}), a, b 和 S 同式(1)。图 2 为 10 m 剖面土壤在不同水吸力下的比水容量, 在低吸力下剖面土壤比水容量差异明显, 而高吸力下差异较小。其中 20 ~ 30 cm、60 ~ 70 cm、750 ~ 850 cm 等土层物理性黏粒含量相对较高, 土体紧实, 其比水容量较小或相对上下土层较小, 释水能力较弱; 而 70 ~ 80 cm、210 ~ 270 cm、950 ~ 1000 cm 等土层物理性砂粒含量相对较高, 土体较为松散, 其比水容量相对较大, 释水能力较强。

表 2 黄土塬区 10 m 剖面土壤水分特征曲线的拟合结果

土层 (cm)	容重 (g cm^{-3})	a	b	R^2	土层 (cm)	容重 (g cm^{-3})	a	b	R^2
0 ~ 10	1.23	45.85	0.153 1	0.990 9	270 ~ 300	1.31	45.18	0.138 1	0.988 9
10 ~ 20	1.32	43.24	0.141 6	0.996 2	300 ~ 350	1.32	46.90	0.1522	0.987 6
20 ~ 30	1.40	42.10	0.145 6	0.982 2	350 ~ 400	1.31	46.67	0.147 5	0.986 9
30 ~ 40	1.37	38.23	0.097 3	0.963 9	400 ~ 450	1.30	46.13	0.125 2	0.994 4
40 ~ 50	1.43	40.50	0.121 4	0.989 4	450 ~ 500	1.28	47.14	0.121 3	0.982 1
50 ~ 60	1.40	40.03	0.168 2	0.984 2	500 ~ 550	1.28	46.54	0.130 1	0.985 4
60 ~ 70	1.34	39.77	0.111 4	0.993 0	550 ~ 600	1.31	46.38	0.125 6	0.991 1
70 ~ 80	1.31	40.66	0.101 7	0.971 4	600 ~ 650	1.29	45.84	0.120 6	0.989 3
80 ~ 100	1.29	41.63	0.106 9	0.973 4	650 ~ 700	1.28	44.66	0.112 9	0.988 5
100 ~ 120	1.27	39.59	0.103 2	0.981 1	700 ~ 750	1.29	45.40	0.115 6	0.990 7
120 ~ 150	1.27	42.58	0.126 3	0.979 3	750 ~ 800	1.32	44.74	0.126 3	0.986 2
150 ~ 180	1.28	41.04	0.123 3	0.969 4	800 ~ 850	1.31	45.65	0.122 1	0.984 7
180 ~ 210	1.29	42.68	0.129 7	0.986 6	850 ~ 900	1.32	46.00	0.133 6	0.977 9
210 ~ 240	1.28	44.17	0.152 7	0.974 8	900 ~ 950	1.32	50.10	0.142 3	0.975 5
240 ~ 270	1.34	45.81	0.149 5	0.978 9	950 ~ 1000	1.29	49.17	0.157 7	0.969 2

2.5 黄土塬区土壤饱和导水率

10 m 剖面土壤饱和导水率变化如图 3 所示。剖面内土壤饱和导水率在 $0.12 \sim 1.45 \text{ mm min}^{-1}$ 之间, 其中表层土壤相对疏松, 饱和导水率达 1.10 mm min^{-1} , 50 ~ 60 cm 层最小, 为 0.12 mm min^{-1} ,

20 ~ 60 cm 土壤紧实层的平均饱和导水率为 0.27 mm min^{-1} 。0 ~ 10 m 剖面内平均饱和导水率为 0.66 mm min^{-1} , 而当土层有大孔隙时, 饱和导水率可达到 $15.46 \text{ mm min}^{-1}$ 。

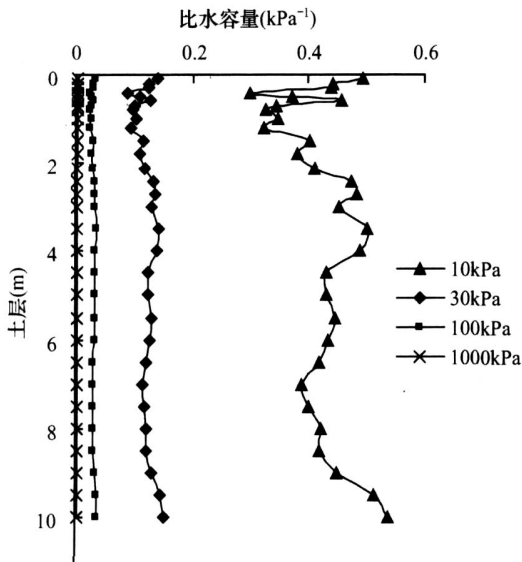


图2 黄土塬区 10 m 土壤剖面比水容量变化

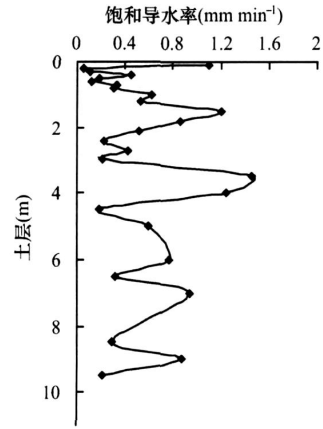


图3 黄土塬区 10 m 剖面土壤饱和导水率变化

2.6 黄土塬区土壤田间持水量与萎蔫湿度

田间持水量和萎蔫湿度是表征土壤持水能力和水分有效性的两个重要参数。田间持水量与土壤质地和容重有关,除由实验测定外,可以通过土壤质地或容重经验关系式和水分特征曲线进行计算。由田间持水量与 0.25~0.05 mm 细砂粒含量和土壤容重之间的经验关系^[1]分别计算其值在 21.07% ± 0.18% 和 22.09% ± 1.12% (质量含水量,下同)之间,另据土壤水分特征曲线由 0.33 × 10⁵ Pa 吸力下土壤含水量代表田间持水量^[9],计算得其值为 20.30% ± 1.76%。对三种计算结果进行平均得土壤田间持水量为 21.16% ± 0.86%。0~1 m 范围变化较大,在 18.65%~21.76% 之间,平均 20.40%; 1~3 m 田间持水量向下减小,20.67%~21.54% 之间,均值为 21.12%,而 3~5 m 田间持水量向下复又增加,在 20.99%~22.01% 之间,均值为 21.37%; 5 m 以下变化不大,在 21.32%~22.18% 之间,均值为 21.76%。

在黄土高原土壤中,萎蔫湿度大小与土壤颗粒组成紧密相关。根据土壤萎蔫湿度与 <0.01 mm 物理性黏粒含量呈正相关计算^[1]其值在 7.46% ± 0.65% 之间。同时,以土壤水吸力 15 × 10⁵ Pa 时的土壤含水量来代表萎蔫湿度^[9],计算得到其值在

10.49% ± 1.24% 之间,与相同方法下测定的该区萎蔫湿度为 9%~12% 的结果相一致^[4],而与李玉山等^[1]应用幼苗法测得黄土高原中壤带土壤萎蔫湿度为 7%~8% 的结论相比偏大。为此,可以根据土壤质地来求得萎蔫湿度,其在土壤剖面内的变化与计算萎蔫湿度的物理性黏粒含量变化趋势一致。土壤有效水含量在 11.41%~14.80% 之间,占田间持水量的 57%~72%,属于中等水平。

2.7 黄土塬区深剖面土壤水分分布状况

于 2005 年 8 月 25 日利用土钻取土烘干测定休闲地 10 m 深剖面土壤含水量。图 4 和图 5 分别为 10 m 深剖面土壤含水率和根据土壤水分特征曲线计算所得土壤水吸力的分布。土壤含水量在 18.00%~22.82% 之间,整个剖面含水量相对较高,没有明显的土壤干燥化现象。在 0~1 m 范围内,由于蒸腾蒸发作用影响明显,土壤含水量出现较大的波动。1~3 m 土壤含水量接近或大于田间持水量,向下逐渐减小,同时土壤水吸力向下增加,水势梯度方向向下,表现为土壤水分向下运动补给深层。3~10 m 土壤含水量呈现波动,占田间持水量的 88%~98%,同时土壤吸力虽有波动但总体上呈向下增加趋势,土壤水分以毛管力为主微弱补给深层土壤。

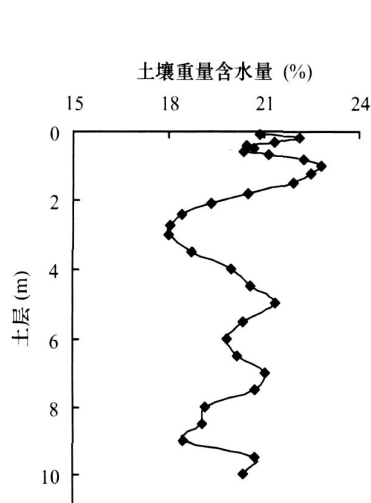


图4 黄土塬区 10 m 剖面土壤含水量分布

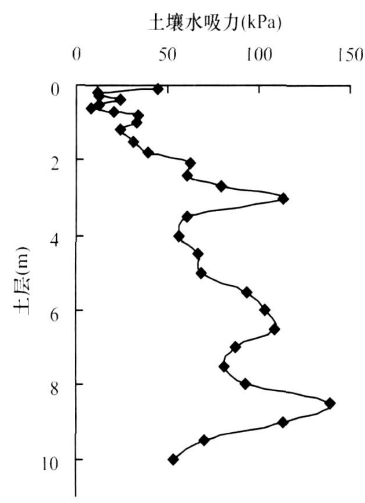


图5 黄土塬区 10 m 剖面土壤水吸力

3 结 论

研究表明,黄土塬区 10 m 深剖面土壤质地大多数为中壤,部分层位土壤偏重为重壤。剖面土壤容重在 $1.23 \sim 1.44 \text{ g cm}^{-3}$ 之间,在 0~1 m 土层内,容重较大,变化明显,平均容重为 1.34 g cm^{-3} ; 而 1~2 m 和 2~10 m 土层平均容重分别为 1.28 g cm^{-3} 和 1.30 g cm^{-3} 。水分特征曲线经幂函数 $= aS^{-b}$ 拟合,其参数 a 值在 2 m 范围内变化较大,在 38.23~45.85 之间,均值为 41.51; 2 m 以下变化相对较小,2~10 m 范围内 a 的均值为 46.36。参数 b 在 10 m 剖面变化较大,其值在 0.097 3~0.168 2 之间,均值为 0.130 8。剖面土壤田间持水量和萎蔫湿度分别为 $21.16\% \pm 0.86\%$ 和 $7.46\% \pm 0.65\%$ 。土壤田间持水量在 0~1 m 变化较大,在 18.65%~21.76% 之间,平均 20.40%; 1~5 m 在 21.54%~22.01% 之间,最小值为 3 m 处的 20.67%,均值为 21.25%; 5 m 以下变化不大,在 21.32%~22.18% 之间,均值为 21.76%。萎蔫湿度在土壤剖面内的变化与计算其值的物理性黏粒含量变化趋势一致。由深剖面内土壤含水量以及水吸力分布可知,测定年

份 7 月、8 月份降雨集中补给深度达 3 m, 3~9 m 土层土壤含水量虽有波动,但整体上表现出向下运动的趋势。

参 考 文 献

- [1] 李玉山,韩仕峰,汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1985,2:1~17
- [2] 杨文治,邵明安,彭新德,等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系. 中国科学(D辑),1998,28(4):357~365
- [3] 史竹叶,刘文兆,郭胜利,等. 中连川小流域土壤水分物理特征及其与地形条件的关系. 干旱地区农业研究,2003,21(4):101~104
- [4] 李玉山,史竹叶,张孝中,等. 长武王东沟小流域土壤墒情影响因素与分布特征. 水土保持通报,1990,6:1~6
- [5] 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):24~37
- [6] 黄明斌,党廷辉,李玉山. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响. 农业工程学报,2002,18(6):50~54
- [7] 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
- [8] 杨平,彭琳,郭明航,等. 王东沟试验区土壤资源调查报告. 见:李玉山,苏陕民主编. 长武王东沟高效生态经济系统综合研究. 北京:科学技术文献出版社,1991.285
- [9] 西南农业大学编. 土壤学(南方本). 北京:农业出版社,1988. 101~102