

# 陕西省洛川县第 3—4 层黄土和古土壤水分特征研究

赵景波<sup>1,2</sup>, 王长燕<sup>3</sup>, 邢 闪<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075; 3. 宝鸡文理学院 灾害监测与机理模拟陕西省重点实验室, 陕西 宝鸡 721007)

**摘 要:** 通过对陕西省洛川县第 3—4 黄土层和第 3—4 红色古土壤层的原状土进行水分特征曲线、田间持水量等项目的实验测定, 分析计算了各层土壤的供水储水性能及有效水分含量。结果表明, 洛川第 3—4 黄土层和第 3—4 红色古土壤层的水分特征曲线与 Van Genuchten 模型非常符合, 相关系数  $R^2$  均达 0.99 以上, 说明采用 Van Genuchten 模型对这 4 个土层的水分含量和能量之间的关系进行描述是比较准确的。0~30 kPa 吸力条件下, 第 3—4 黄土层比第 3—4 红色古土壤层持水量高, 黄土层的供水(释水)性能和储水性能强于古土壤。这 4 个土层随着吸力的增加, 在较低吸力段供水性能和储水性能减弱幅度较大, 在较高吸力段减弱幅度较小。黄土层所能容纳的有效水含量、饱和含水量与田间持水量均大于红色古土壤层, 黄土层的稳定凋萎湿度一般小于红色古土壤的稳定凋萎湿度。

**关键词:** 黄土与古土壤; 水分特征曲线; 持水能力; 有效水分含量; 饱和含水量; 稳定凋萎湿度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)04-0010-06

中图分类号: S152.7

## Soil Moisture Characteristics of Third and Fourth Horizons of Loess and Paleosols in Luochuan County of Shaanxi Province

ZHAO Jing-bo<sup>1</sup>, WANG Chang-yan<sup>3</sup>, XING Shan<sup>1</sup>

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province, Baoji College of Arts and Science, Baoji, Shaanxi 721007, China)

**Abstract:** Based on determination of soil water retention curves and field moisture capacity of intact soil samples of Loess and Paleosols in Luochuan County, Shaanxi Province, the study analyzed the physical soil properties including soil moisture storage, holding capacity and effective moisture content. The results indicate that the water retention curves of soil samples could be described well with Van Genuchten model with the high  $R^2$  values (over 0.99). The water holding capacity of the loess samples were higher than that of the Paleosol samples in the range of 0 to 30 kPa, suggesting that loess performs better in water supply and storage. With increasing suction values, water supply and storage reduced with larger amplitude in low suction range and smaller amplitude in high suction range. Loess showed higher available water content, saturated water content and field holding capacity, and lower permanent wilting point than paleosol.

**Keywords:** loess and paleosol; water retention curve; field holding capacity; available water content; saturated water content; permanent wilting point

土壤水分特征曲线是描述土壤含水量与土壤吸力之间的关系曲线, 它反映了土壤水能量与土壤水含量的函数关系, 是表征土壤基本水力特性的重要指标, 对研究土壤水滞留与运移具有十分重要的作用, 因此受到众多学者的关注<sup>[1-2]</sup>。目前许多学者对我国现代主要土类大多已进行小于 1.5 MPa 的土壤水分

曲线及持水性质实验研究<sup>[3-5]</sup>。国内学者<sup>[6-9]</sup>和国外学者<sup>[10-12]</sup>对中国黄土地层代表的环境变化进行了大量研究, 但对黄土剖面中黄土与红色古土壤层水分特征曲线还未涉及。黄土高原是我国西北土壤资源最发育的地区<sup>[13-14]</sup>, 又是世界上水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区之一, 植被建设、生态环境恢复的

收稿日期: 2011-01-07

修回日期: 2011-10-31

资助项目: 国家自然科学基金项目“陕西省黄土高原黄土成壤强度对地下水富集规律控制研究”(40672108); 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室科研项目(SKLLQG09011)

作者简介: 赵景波(1953—), 男(汉族), 山东省滕州市人, 教授, 博士生导师, 主要从事第四纪与区域环境研究。E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn。

主要限制因素是土壤水分。了解黄土高原土壤水分特征曲线,对于研究黄土水库中土壤水分的储存、保持、运移、供应、土壤水分与植被吸水之间关系的机理都具有重要意义<sup>[15]</sup>。本研究通过对洛川县黄土塬第 3—4 黄土层和第 3—4 红色古土壤土层的水分特征曲线、田间持水量、容重项目等的测定,研究了这 4 个土层土壤的持水性能,并计算出不同层位有效水的范围,以期为黄土水资源利用和土壤水库建设以及生态环境恢复提供科学依据。

## 1 研究区概况及剖面选择

洛川县地处陕西省中部,黄土高原南部,洛河中游,位于东经 109°18′14″—109°45′47″,北纬 35°26′29″—36°04′12″,为典型的黄土高原沟壑区,塬面开阔平坦,平均海拔 1 100 m。塬区黄土地层齐全,厚约 140 m,是高原型黄土塬的典型代表。黄土地层覆盖在上新世三趾马红色黏土之上。塬体主要由更新世黄土构成,表面有极薄的全新世黄土。洛川县气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,早晚温差较大,年平均气温 9.2 °C,极端最低气温 -22 °C,≥10 °C 的积温为 3 007 °C,年日照时数 2 251 h。年均降水量 623.3 mm,7—9 月占年降水量的 60%,夏季多雨而无酷暑,冬季少雪而干冷。研究剖面位于洛川县城西边凤栖镇西沟边坡上,距洛川县城西约 1 km。剖面出露清楚、地层连续完整、层位稳定。本剖面全新世黄土和全新世古土壤已被侵蚀掉,现代耕作层之下为晚更新世马兰黄土(L<sub>1</sub>)。

## 2 实验方法

对洛川剖面第 2 层古土壤之上层位的土壤水分特征曲线已做过研究,本实验主要研究第 3—4 黄土层和第 3—4 古土壤的水分特征曲线。在第 3—4 黄土层和第 3—4 古土壤的中上部和中下部用直径 15.5 cm,容积 2 924.7 cm<sup>3</sup> 的环刀采取原状土,在每层的中上部和中下部分别采样 1 块,共采集样品 8 块。在第 3 层黄土中上部和中下部的两个样品分别标记为 L<sub>3-1</sub> 和 L<sub>3-2</sub>,第 4 层黄土的中上部和中下部分别标记为 L<sub>4-1</sub> 和 L<sub>4-2</sub>,第 3 层古土壤的中上部和中下部分别标记为 S<sub>3-1</sub> 和 S<sub>3-2</sub>,第 4 层古土壤的中上部和中下部分别标记为 S<sub>4-1</sub> 和 S<sub>4-2</sub>。在实验室对所采样品进行土壤水分特征曲线的测定。本实验采用张力计法,吸力测定范围为 0~85 kPa,主要测定样品的脱湿过程和吸湿过程,获得土壤含水量和吸力之间的关系。吸力值由真空表直接读取,土壤含水量采用烘干法测定,先得到土壤重量含水量,然后将重量含水量

转换为体积含水量,以便进行体积含水量和吸力之间的关系分析。土壤干容重采用环刀法和烘干法进行测定,田间持水量采用威尔科克斯法<sup>[16]</sup>测定。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤水分特征曲线的拟合

将实验计算获得的 L<sub>3</sub>—S<sub>4</sub> 土层的体积含水量和吸力的系列值点绘于图 1 中。从图 1 可以看出,L<sub>3</sub>—S<sub>4</sub> 黄土和古土壤的含水量都随吸力的增加而减少,随吸力的降低而增多。每个样品的吸湿曲线基本都在脱湿曲线下方,即同样的吸力,脱湿过程对应的含水量高于吸湿过程对应的含水量,只是当吸力值为 60 kPa 以上时吸湿曲线略微高于脱湿曲线。因为本实验测定的最高吸力值为 85 kPa,所以该实验的水分特征曲线仍表现出明显的滞后现象。

为定量研究土壤的水分特征曲线,前人提出了很多的数学模拟方程<sup>[17-19]</sup>。其中 Gardner 模型、Brooks—Corey 模型与 Van Genuchten 模型是最常用的土壤水分特征曲线模型。由于 Gardner 模型不能精确描述土壤水分特征曲线的整个变化过程尤其是饱和含水量附近的曲线变化趋势,Brooks—Corey 模型存在非连续性问题,而 Van Genuchten 模型具有连续性,适用土壤质地范围比较宽,应用土壤含水量范围较广<sup>[20-21]</sup>,所以采用 Van Genuchten 模型对实验结果进行拟合。Van Genuchten 模型的数学表达式为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m$$

式中: $\theta$ ——体积含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $\theta_r$ ——滞留含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $\theta_s$ ——饱和含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $h$ ——土壤吸力(cm); $m, n, a$ ——拟合参数,且  $m = 1 - 1/n$ 。

模型中共有 4 个参数,一般求解难度较大,借助新版 Origin 8 软件来实现参数的求解和曲线拟合(图 1),拟合结果列于表 1—2 之中。从表 1—2 可以看出,无论是脱湿曲线还是吸湿曲线,其拟合的 R<sup>2</sup> 值均高达 0.99 以上,说明洛川 L<sub>3</sub>—S<sub>4</sub> 层土壤的水分特征曲线与 Van Genuchten 模型非常符合。

### 3.2 L<sub>3</sub>—S<sub>4</sub> 土壤持水性分析

土壤的持水性是指土壤吸持水分的能力。土壤所吸持的水分是由土壤孔隙的毛管引力和土壤颗粒的分子引力所引起的,这两种力统称为土壤吸力,土壤水分特征曲线就是表征土壤吸力与土壤水分的关系,是研究土壤持水特性的重要资料。在同一吸力条

件下,含水量越高,表明土壤持水性越强,反之说明持水性弱。由实验结果可知(图 1), $L_3$ — $S_4$  脱湿曲线和吸湿曲线都有一个交叉点,约在 70 kPa 左右。就脱湿曲线来说,0~30 kPa 之间, $L_3$  和  $L_4$  的含水量高于  $S_3$  和  $S_4$  古土壤层,说明该范围内第 3—4 层黄土比第 3—4 层红色古土壤持水量高,第 3 层黄土上部含水量最高,第 4 层红色古土壤上部 and 下部含水量都很低;吸力高于 30 kPa 后,第 4 层红色古土壤下部含水量最低,第 3 层黄土上部次之,第 3 层黄土下部存在

波动变化,其他样品的含水量大致相当。就吸湿曲线来说,0~30 kPa 之间, $L_3$  和  $L_4$  黄土层的含水量也高于  $S_3$  和  $S_4$  古土壤层,吸力大于 30 kPa 后,第 4 层黄土下部含水量最高,第 4 层红色古土壤下部含水量最低, $L_3$  和  $L_4$  黄土层上部都低于或接近  $S_3$  和  $S_4$  古土壤。综合脱湿和吸湿曲线可以发现,0~30 kPa 之间,第 3—4 层黄土比第 3—4 层古土壤持水量高, $L_3$  黄土上部持水量随吸力增加降低最明显, $S_4$  古土壤下部持水性能最差。

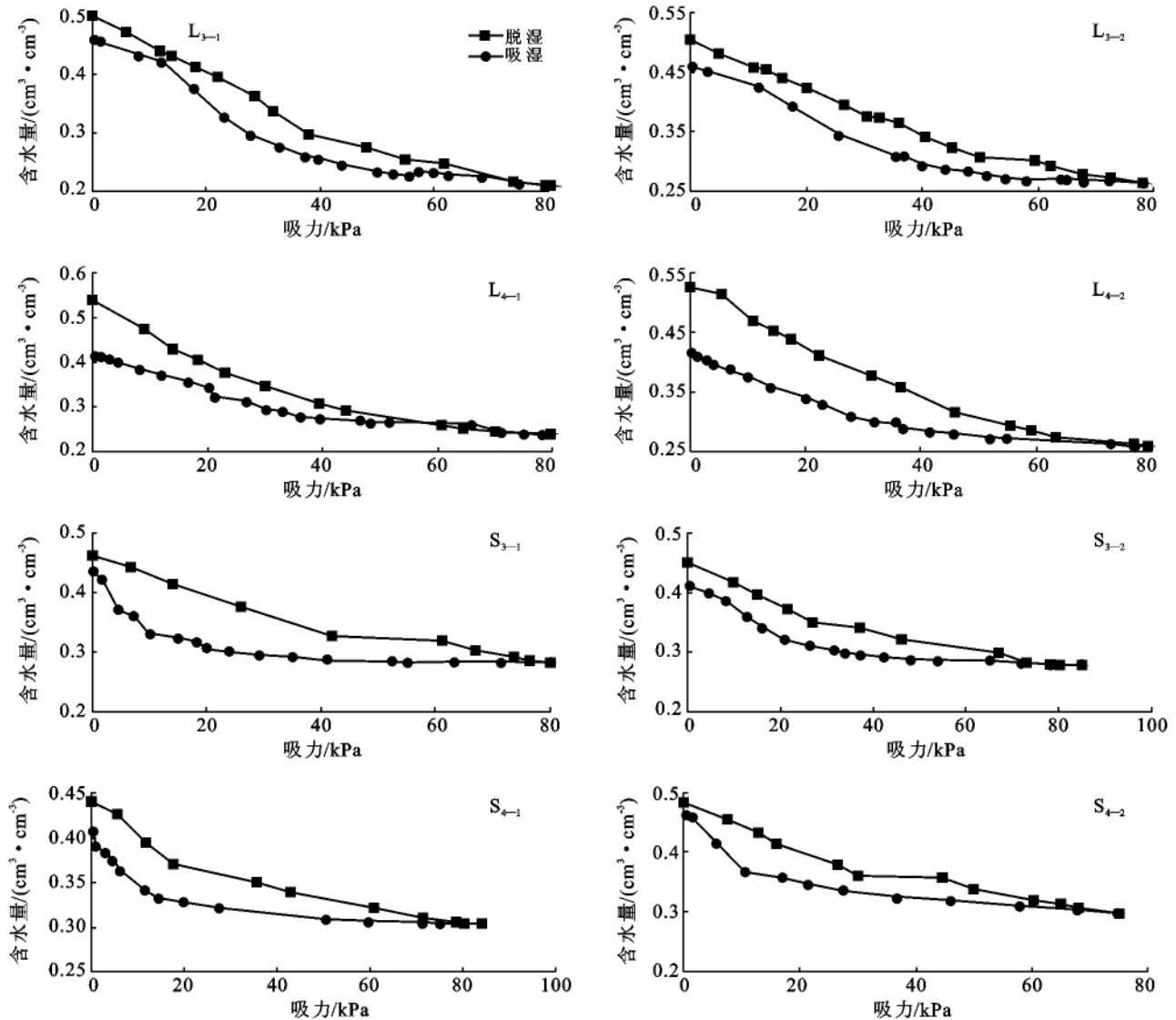


图 1 洛川  $L_3$ — $S_4$  土壤脱湿和吸湿过程实测数据拟合曲线

注: $L_{3-1}$ , $L_{3-2}$  分别为第 3 层黄土的中上部和中下部; $L_{4-1}$ , $L_{4-2}$  分别为第 4 层黄土的中上部和中下部;

$S_{3-1}$ , $S_{3-2}$  分别为第 3 层古土壤的中上部和中下部; $S_{4-1}$ , $S_{4-2}$  分别为第 4 层古土壤的中上部和中下部

### 3.3 土层比水容量与供水性能

土壤水分特征曲线的斜率称为比水容量 [ $C_{(θ)}$ ], 它表示单位吸力变化时单位质量土壤可释放或储存的水量, 是评价土壤水分有效性、供水性和耐旱性的重要指标<sup>[18]</sup>。比水容量越大, 说明其释水或储水性能越好。

脱湿时的比水容量反映土壤的释水或供水性能。实验结果表明(图 2),  $L_3$  在小于约 20 kPa 时, 随吸力值的增加, 其脱湿时的比水容量呈递增趋势, 反映土壤的释水(供水)性能随吸力值的增加逐渐增强, 吸力大于约 20 kPa 后, 比水容量随吸力值增加而递减, 反映出该

范围内土壤的释水(供水)性能随吸力值的增加而逐渐减弱。其他样品的比水容量在整个范围内都随吸力值的增加而逐渐减小。总体而言,  $L_3$  层土壤的比水容量最高,  $S_4$  的比水容量最低, 反映  $L_3$  的释水(供

水)性能最强,  $S_4$  最弱。从比水容量曲线的变化幅度来看,  $L_3$  上部不论是小于 20 kPa 范围内的递增变化还是大于 20 kPa 范围内的递减变化, 其变化幅度都是最大的,  $S_4$  上部在整个范围内递减幅度最小。

表 1 洛川县  $L_3-S_4$  土壤样品脱湿曲线参数值

层位	$\theta_r$	$\theta_s$	$a$	$n$	$R^2$	数学表达式
$L_{3-1}$	0.134	0.464	0.037	2.694	0.996	$\theta=0.132+0.331/\zeta 1+(0.037h)^{2.694}$ $^{0.629}$
$L_{3-2}$	0.126	0.434	0.034	2.148	0.997	$\theta=0.126+0.308/\zeta 1+(0.034h)^{2.148}$ $^{0.535}$
$S_{3-1}$	0.153	0.420	0.059	1.577	0.998	$\theta=0.153+0.267/\zeta 1+(0.059h)^{1.577}$ $^{0.366}$
$S_{3-2}$	0.156	0.405	0.076	1.534	0.998	$\theta=0.156+0.249/\zeta 1+(0.076h)^{1.534}$ $^{0.348}$
$L_{4-1}$	0.028	0.448	0.051	1.489	0.992	$\theta=0.028+0.42/\zeta 1+(0.051h)^{1.489}$ $^{0.328}$
$L_{4-2}$	0.104	0.431	0.046	1.513	0.995	$\theta=0.104+0.327/\zeta 1+(0.046h)^{1.513}$ $^{0.339}$
$S_{4-1}$	0.163	0.396	0.179	1.335	0.997	$\theta=0.163+0.233/\zeta 1+(0.179h)^{1.335}$ $^{0.251}$
$S_{4-2}$	0.078	0.392	0.053	1.681	0.998	$\theta=0.077+0.314/\zeta 1+(0.053h)^{1.681}$ $^{0.405}$

注:  $\theta$  为体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_r$  为滞留含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$  为饱和含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $h$  为土壤吸力(cm);  $m, n, a$  为拟合参数。下同。

表 2 洛川  $L_3-S_4$  土壤样品吸湿曲线参数值

层位	$\theta_r$	$\theta_s$	$a$	$n$	$R^2$	数学表达式
$L_{3-1}$	0.189	0.431	0.052	3.221	0.998	$\theta=0.189+0.243/\zeta 1+(0.052h)^{3.221}$ $^{0.69}$
$L_{3-2}$	0.206	0.407	0.049	2.975	0.999	$\theta=0.206+0.201/\zeta 1+(0.05h)^{2.975}$ $^{0.664}$
$S_{3-1}$	0.237	0.415	0.307	1.705	0.991	$\theta=0.237+0.178/\zeta 1+(0.308h)^{1.705}$ $^{0.414}$
$S_{3-2}$	0.244	0.379	0.082	2.623	0.998	$\theta=0.244+0.135/\zeta 1+(0.082h)^{2.623}$ $^{0.619}$
$L_{4-1}$	0.191	0.397	0.059	2.124	0.991	$\theta=0.191+0.206/\zeta 1+(0.059h)^{2.124}$ $^{0.529}$
$L_{4-2}$	0.227	0.412	0.063	2.012	0.996	$\theta=0.227+0.185/\zeta 1+(0.063h)^{2.012}$ $^{0.503}$
$S_{4-1}$	0.226	0.362	0.310	1.450	0.992	$\theta=0.226+0.137/\zeta 1+(0.31h)^{1.45}$ $^{0.31}$
$S_{4-2}$	0.180	0.375	0.179	1.848	0.998	$\theta=0.181+0.195/\zeta 1+(0.179h)^{1.848}$ $^{0.459}$

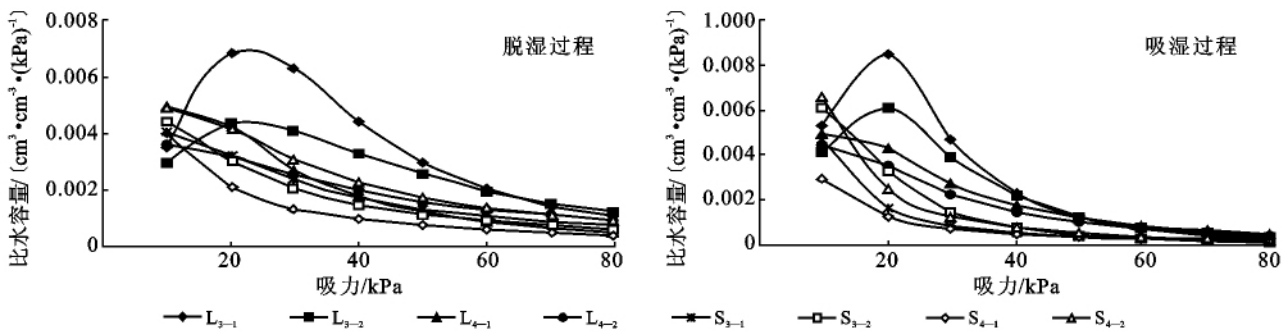


图 2 洛川  $L_3-S_4$  土壤脱湿和吸湿时的比水容量曲线

吸湿时的比水容量反映土壤的储水性能。实验结果显示(图 2), 第 3 层黄土在小于约 20 kPa 时, 随吸力值的增加, 其脱湿时的比水容量呈递增趋势, 反映土壤的储水性能随吸力值的增加逐渐增强, 吸力大于约 20 kPa 后, 比水容量随吸力值增加而递减, 反映出该范围内土壤的储水性能随吸力值的增加逐渐减弱。其他样品的比水容量在整个范围内都随吸力值的增加而逐渐减小。总体对比来看,  $L_3$  和  $L_4$  黄土层的比水容量大于  $S_3$  和  $S_4$  古土壤层, 说明  $L_3$  和  $L_4$  黄土层的储水性能比  $S_3$  和  $S_4$  古土壤层强。从比水容

量曲线的变化幅度来看, 在小于约 50 kPa 范围内,  $L_3$  和  $L_4$  黄土层的比水容量变化幅度很大, 其后变化幅度减小;  $S_3$  和  $S_4$  古土壤层小于约 30 kPa 范围内变化幅度较大, 其后变化幅度减小。

### 3.4 第 3 层黄土至第 4 层古土壤水分含量

土壤水分分为重力水、有效水和无效水 3 种, 饱和和持水量与田间持水量之间的水分为重力水, 田间持水量与稳定凋萎湿度之间为有效水, 稳定凋萎湿度含量以下的水为无效水。

田间持水量采用威尔科克斯实验方法<sup>[16]</sup>获得,

稳定凋萎湿度一般以 1 500 kPa 吸力对应的土壤含水量来确定<sup>[19]</sup>。L<sub>3</sub> 和 S<sub>4</sub> 各样品释水条件下的不同水分含量如表 3 所示。从表 3 可以看出, L<sub>4</sub> 上部和 S<sub>4</sub> 下部稳定凋萎湿度最低, 分别为 5.8% 和 6.9%, 说明其水分利用的下限最低。S<sub>4</sub> 上部稳定凋萎湿度最

高, 为 14.8%, 说明其水分利用的下限最高。L<sub>4</sub> 上部所能容纳的有效水含量最多, 为 18.3%, S<sub>4</sub> 下部次之, 为 15.3%; 从 L<sub>3</sub>—S<sub>4</sub> 各样品所能容纳的有效水含量来看, 总体上表现为黄土层所能容纳的有效水含量多于红土层。

表 3 释水条件下 L<sub>3</sub>—S<sub>4</sub> 土壤水分含量

层位	容重/ (kg · cm <sup>-3</sup> )	饱和含水量/ %	田间持水量/ %	稳定凋萎湿度/ %	重力水含量/ %	有效水含量/ %
L <sub>3-1</sub>	1.343	34.9	21.8	9.9	13.1	11.9
L <sub>3-2</sub>	1.333	34.6	23.1	9.6	11.5	13.5
S <sub>3-1</sub>	1.456	30.2	19.2	12.9	11.0	6.3
S <sub>3-2</sub>	1.481	28.3	17.9	13.1	10.4	4.8
L <sub>4-1</sub>	1.206	38.0	24.1	5.8	13.9	18.3
L <sub>4-2</sub>	1.251	36.8	22.6	10.5	14.2	12.1
S <sub>4-1</sub>	1.509	26.2	18.4	14.8	7.8	7.0
S <sub>4-2</sub>	1.405	27.9	22.2	6.9	15.7	15.3

#### 4 黄土与红色古土壤水理性质差异分析

由以上分析可以看出, 黄土与红色古土壤水理性质差异明显, L<sub>3</sub> 和 L<sub>4</sub> 黄土层比 S<sub>3</sub> 和 S<sub>4</sub> 红色古土壤层持水量高, 黄土层所能容纳的有效含水量多于红色古土壤层, 黄土层的饱和含水量与田间持水量一般大于古土壤, 黄土层的供水性强于古土壤, 而黄土层的稳定凋萎湿度一般小于古土壤。

不同成因的沉积物水理性质不同, 河流、洪流等流水作用搬运、沉积的粗粒碎屑松散沉积层的渗透性主要是水动力条件决定的。虽然黄土地层的物质是风力作用带来的, 但黄土地层的孔隙、孔洞、裂隙和黏土成分主要是在其堆积后的成壤过程中产生的<sup>[13-14]</sup>, 所以黄土与红色古土壤的水理性质主要是在成壤过程中形成的。因黄土层被埋藏后会受到重力作用的影响, 但本研究的 4 个土层位于剖面上部, 受重力作用影响很小, 所以它们的水理性质主要取决于当时气候条件决定的成壤作用的强弱。由于黄土层发育时气候冷干<sup>[6-7, 10]</sup>, 成壤作用较弱, 黏化作用不明显, 形成的黏粒少, 粗粉砂含量高, 孔隙发育, 孔隙度较高, 孔径也较大。

红褐色古土壤发育时气候温湿<sup>[6-7, 9-12]</sup>, 成壤作用较强, 黏化作用明显, 形成的黏粒较多, 黏土含量高, 粒度成分较细, 孔隙度较低, 孔隙较小。这些特点的不同决定了黄土层水理性质与红色古土壤层存在明显的不同。

#### 5 结论

(1) 洛川第 3—4 黄土层与第 3—4 红色古土壤

层的水分特征曲线与 Van Genuchten 模型非常符合, R<sup>2</sup> 值均高达 0.99 以上, 说明用 Van Genuchten 模型来描述洛川第 3—4 黄土层和第 3—4 红色古土壤层的水分数量和能量之间的关系是比较准确的。

(2) 0~30 kPa 吸力范围内, 第 3—4 黄土层比第 3—4 层红色古土壤持水量高, 第 3 层黄土中上部持水量随吸力增加降低最明显, 第 4 层古土壤中下部持水性能最差。

(3) 黄土层的释水(供水)性能和储水性能强于古土壤, 第 3 层黄土的释水(供水)性能最强, 第 4 层古土壤中上部释水(供水)性能和储水性能最弱。第 3—4 黄土层和第 3—4 层红色古土壤随着吸力的增加, 在较低吸力段释水(供水)性能和储水性能减弱幅度大, 在较高吸力段减弱幅度小。

(4) 第 3—4 黄土层所能容纳的有效含水量、饱和含水量与田间持水量大于第 3—4 层红色古土壤, 其中第 4 层黄土所能容纳的有效水含量最多, 第 3—4 黄土层的稳定凋萎湿度一般小于第 3—4 层红色古土壤。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Huang Guanhua, Zhang Renduo, Huang Quanzhong. Modeling soil water retention curve with a fractal method[J]. Pedosphere, 2006, 16(2): 137-146.
- [2] 韩祥伟, 邵明安, 王全九. 简单入渗法在确定 Brooks—Corey 水分特征曲线模型参数中的应用研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 506-508.
- [3] 白玉, 张玉龙. 半干旱地区风沙土水分特征曲线 VG 模型参数的空间变异性[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(3): 318-323.

- [4] 王风,韩晓增,李海波,等. 不同黑土生态系统的土壤水分物理性质研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 67-70.
- [5] 柳云龙,施振香,尹骏,等. 旱地红壤与红壤性水稻土壤水分特性分析[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 232-235.
- [6] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 350-351.
- [7] 安芷生,吴锡浩,汪品先,等. 最近 130 ka 中国的古季风 II: 古季风变迁[J]. 中国科学(B): 化学, 1991, 21(11): 1209-1215.
- [8] 鹿化煜,安芷生. 黄土高原粒度组成的古气候意义[J]. 中国科学(D): 地球科学, 1998, 28(3): 278-283.
- [9] 赵景波,顾静,杜娟. 关中平原第5层古土壤发育时的气候与土壤水环境研究[J]. 中国科学(D): 地球科学, 2008, 38(3): 364-374.
- [10] Porter S C, An Zhisheng. Episodic gullying and paleomonsoon cycles on the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Research, 2005, 64(2): 234-241.
- [11] Porter S C, An Zhisheng. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation[J]. Nature, 1995, 375(6529): 305-308.
- [12] Kohfeld K E, Harrison S P. Glacial-interglacial changes in dust deposition on the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Review, 2003, 22(3): 1859-1878.
- [13] 赵景波. 黄土的本质与形成模式[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 459-466.
- [14] 赵景波. 淀积理论与黄土高原环境演变[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [15] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of water I: Redistribution [J]. Water Resource Res, 1970, 6(3): 851-861.
- [16] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data [J]. Soil Sci., 1974, 117(6): 311-314.
- [17] Van Genuchten R. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44(5): 892-898.
- [18] 肖建英,李永涛,王丽. 利用 Van Genuchten 模型拟合土壤水分特征曲线[J]. 地下水, 2007, 29(5): 46-47.
- [19] 张玉龙. 关于土壤水分特征曲线空间变异性的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 1993.
- [20] 窦建德,王绪芳,熊伟,等. 宁夏六盘山北侧5种典型植被的土壤持水性能研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(3): 301-306.
- [21] 西南农业大学. 土壤学: 南方本[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 1988: 101-102.

(上接第4页)

- [11] Liu Weixing, Zhang Zhe, Wan Shiqiang. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(1): 184-195.
- [12] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO<sub>2</sub> flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. Global Change Biology, 2007, 13(2): 426-436.
- [13] 贺金红,廖允成,胡兵辉,等. 黄土高原坡耕地退耕还林(草)的生态经济效应研究[J]. 农业现代化研究, 2006, 27(2): 110-114.
- [14] 王志强,刘宝元,王旭艳. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(10): 1397-1412.
- [15] Tang Xuli, Liu Shuguang, Zhou Guoyi, et al. Soil atmospheric exchange of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in three subtropical forest ecosystems in Southern China [J]. Global Change Biology, 2006, 12(3): 546-560.
- [16] 刘光菘. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法: 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [17] Bajracharya R M, Lal R, Kimble J M. Diurnal and seasonal CO<sub>2</sub>-C flux from soil as related to erosion phases in Central Ohio [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 286-293.
- [18] Bodrliguez M L, Taboada M M. Sediment and phosphorus loss in runoff from an agroforestry catchment, NW, Spain [J]. Land Degradation and Development, 2010, 21(4): 161-170.
- [19] Jacinthe P A, Lal R, Owens L B, et al. Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics [J]. Soil Till. Res., 2004, 77(2): 111-123.
- [20] Huxman T E, Turnipseed A A, Sparks J P, et al. Temperature as a control over ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes in a high-elevation, subalpine forest [J]. Oecologia, 2003, 134: 537-546.