

# 砂姜黑土的水分特性及其与土壤易旱的关系

孙怀文

(安徽省水利科学研究所, 233000)

## 摘 要

本文通过实验对砂姜黑土的水分特性及其与土壤易旱的关系进行了分析研究。结果表明:砂姜黑土持水性能较差,有效水分不仅含量较低,而且低吸力段所占比重较小;比水容量随吸力增大而急剧减少,在10—30kPa时即已减小到 $10^{-7}$ 数量级( $\text{ml/g} \cdot \text{Pa}$ )。土壤导水性能弱,土壤吸力 $>30\text{kPa}$ 后水分移动极其缓慢。说明土壤的供水容量和供水强度均较小,不利于对作物的及时供水。土壤毛管水上升速度缓慢,上升高度小,不利于作物对地下水的利用。土壤上部土层蒸发强度大,不利于保水;下部土层毛管性能微弱,水分运行缓慢,虽有利于保水,但不能及时补充根层所需的作物供水。这些特性综合反映了砂姜黑土的抗旱性较弱,是土壤易旱的主要原因。

**关键词** 砂姜黑土,水分特性,供水,保水,易旱

砂姜黑土主要分布于皖、豫、鲁、苏等省淮河以北的广大平原地区,面积达400余万公顷,是我国黄淮海平原面积最大的低产土壤之一。其低产系由于多种因素所引起,其中土壤易旱是主要因素之一,而降水分配不均,土壤供水保水性能较差,则是导致土壤易旱的根本原因。因此,研究与土壤供水保水性能有关的水分特性,诸如土壤的持水性能、导水性能、毛管水上升性能和水分蒸发性能等,对于砂姜黑土的改良与开发利用具有一定意义。

## 一、土壤持水性能

土壤的持水性能取决于土壤的颗粒组成、结构性和孔隙性。砂姜黑土的结构性较差,耕层 $>0-25\text{mm}$ 的水稳性团聚体只有20%左右,耕层以下为稳定的稜柱状和稜块状结构,结构体较为密实,且表面被覆着胶膜<sup>[1]</sup>。另外,砂姜黑土由于土体中含有较多的砂姜,占据了一定的空间,也影响到土壤的持水能力。所以砂姜黑土虽然质地较为粘重,但其持水能力却不强。据测定,砂姜黑土1m土层内能够保持的最大水量一般为350mm左右,而其中能够供作物吸收利用的有效水分只不过150mm左右,而且低吸力段( $<100\text{kPa}$ )所占比重较小,仅占30%左右(表1)。

一般认为,土壤持水量在低吸力段( $<100\text{kPa}$ )主要取决于土壤的结构,中吸力段

表 1 砂姜黑土的田间持水量和有效水分含量

Table 1 Field moisture capacity and available water content of calcic concretion black soil

采土地点 Sampling site	土层深度 Depth (cm)	田间持水量 Field moisture capacity (mm)	凋萎含水量 Wilting water content (mm)	有效水分含量 Available water content (mm)	土壤吸力 <100kPa 的有效水分 Available water of soil suction <100 kPa (mm)	土壤吸力 >100kPa 的有效水分 Available water of soil suction >100 kPa (mm)
安徽水科 所新马桥 试验站	0—20	62.7	30.5	32.2	10.2	22.0
	20—28	26.0	15.7	10.3	3.8	6.5
	28—56	110.6	64.9	45.7	12.3	33.4
	56—100	159.4	98.1	61.3	20.8	40.5
	0—100	358.7	209.2	149.5	47.1	102.4

(100—1500 kPa) 和高吸力段 (>1500 kPa) 则取决于土壤的质地<sup>[4]</sup>。故作者在测定土壤的持水特性时,低吸力段系取原状土采用负压计称重法测定,中吸力段则制备扰动土样(过 1mm 筛孔)采用压膜法测定。

砂姜黑土的持水量如图 1 所示,其持水曲线在 5—10kPa 阶段迅速下降,超过 10kPa 以后曲线则比较平缓,说明在低吸力段随着吸力增高而释出的水分较少。

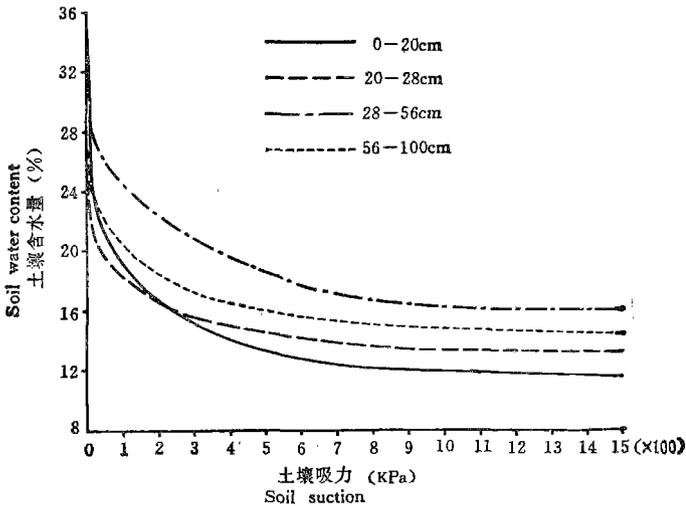


图 1 砂姜黑土的持水曲线

Fig. 1 Moisture retention of calcic concretion black soil

土壤水分的有效性可用持水曲线的斜率即比水容量来表示,它反映了在相同条件下,当土壤吸力增高时,植物所能吸收的水量要比低吸力下吸到的少。其大小说明不同吸力阶段植物吸收同样的水量所耗费的能量不同。比水容量愈大,植物吸水耗能愈少,水分对植物的有效性愈大;反之则愈小。砂姜黑土不同吸力阶段的比水容量如表 2 所示,耕层土壤吸力在 2—10kPa 时,比水容量为 0.6ml/g·Pa;吸力从 10kPa 增加到 30kPa 时,比水

容量下降为  $10^{-7}$  数量级; 超过 300kPa 时, 比水容量下降到  $10^{-8}$  数量级。耕层以下各个吸力阶段的比水量均具有与其相同的变化规律, 不过在 100kPa 吸力范围内耕层的比水量要比以下各层为大。这是耕层的结构性和孔隙性相对比以下各层都要好的缘故。

表 2 砂姜黑土不同吸力段的比水容量 ( $\text{ml/g} \cdot \text{Pa}$ )<sup>1)</sup>

Table 2 specific water capacities of calcic concretion black soil at different suction range

土层深度 Depth (cm)	比 水 容 量 Specific water capacities							
	2—10 (kPa)	10—30 (kPa)	30—50 (kPa)	50—70 (kPa)	70—100 (kPa)	100—300 (kPa)	300—800 (kPa)	800—1500 (kPa)
0—20	$5.96 \times 10^{-6}$	$9.51 \times 10^{-7}$	$4.15 \times 10^{-7}$	$3.35 \times 10^{-7}$	$3.07 \times 10^{-7}$	$2.21 \times 10^{-7}$	$5.56 \times 10^{-8}$	$9.00 \times 10^{-9}$
20—28	$2.56 \times 10^{-6}$	$7.15 \times 10^{-7}$	$3.75 \times 10^{-7}$	$2.55 \times 10^{-7}$	$2.30 \times 10^{-7}$	$1.34 \times 10^{-7}$	$4.04 \times 10^{-8}$	$7.29 \times 10^{-9}$
28—56	$2.85 \times 10^{-6}$	$6.18 \times 10^{-7}$	$2.50 \times 10^{-7}$	$2.00 \times 10^{-7}$	$1.83 \times 10^{-7}$	$1.77 \times 10^{-7}$	$8.68 \times 10^{-8}$	$9.86 \times 10^{-9}$
56—100	$2.16 \times 10^{-6}$	$3.95 \times 10^{-7}$	$3.35 \times 10^{-7}$	$2.85 \times 10^{-7}$	$2.30 \times 10^{-7}$	$1.52 \times 10^{-7}$	$4.54 \times 10^{-8}$	$9.43 \times 10^{-9}$

<sup>1)</sup> 低吸力段的比水容量系根据原状土持水曲线求得。

上述说明了砂姜黑土随着吸力的增加, 土壤水分的有效性呈现出快速下降的特点, 特别在低吸力阶段, 在 10—30kPa 时, 比水容量即已下降到  $10^{-7}$  数量级, 从而使土壤对作物的供水在低吸力阶段就已较早地产生困难<sup>[3]</sup>。砂姜黑土与其他土壤相比, 如红壤、棕壤以及淮北地区的坡黄土(潮棕壤)等<sup>[2,4,5,6]</sup>, 在有效水分范围内同一吸力下的比水容量, 砂姜黑土一般要低数倍至 10 倍以上, 尤其在低吸力阶段相差更大。这说明砂姜黑土的供水能力较低, 抗旱性能较弱。

为了说明低吸力阶段土壤结构对持水性能的影响, 特将原状土磨细(过 1 mm 筛孔)用负压计称重法测定了结构破坏后的持水性能, 其结果列于表 3。从表 3 可以看出, 同一吸力阶段, 磨细土的比水容量要比原状土高 1—2 倍。说明砂姜黑土在低吸力阶段, 其结构性差对土壤持水性能产生的不良影响较为明显。

表 3 砂姜黑土低吸力段磨细土的比水容量( $\text{ml/g} \cdot \text{Pa}$ )

Table 3 Specific water capacities of ground calcic concretion black soil at low suction range

土层深度 Depth (cm)	比 水 容 量 Specific water capacities				
	2—10 (kPa)	10—30 (kPa)	30—50 (kPa)	50—70 (kPa)	70—100 (kPa)
0—20	$4.18 \times 10^{-6}$	$2.49 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^{-6}$	$6.65 \times 10^{-7}$	$5.53 \times 10^{-7}$
20—28	$3.00 \times 10^{-6}$	$1.72 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{-6}$	$6.70 \times 10^{-7}$	$4.80 \times 10^{-7}$
28—56	$3.09 \times 10^{-6}$	$2.03 \times 10^{-6}$	$9.00 \times 10^{-7}$	$5.30 \times 10^{-7}$	$4.80 \times 10^{-7}$
56—100	$2.18 \times 10^{-6}$	$1.33 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-6}$	$4.90 \times 10^{-7}$	$3.61 \times 10^{-7}$

## 二、土壤导水性能

土壤导水性能的强弱决定着土壤水分的移动速度, 在非饱和水条件下则为土壤的供

水强度,通常用非饱和导水率来表示。为了说明砂姜黑土的供水强度,作者采用稳定蒸发法测定了土壤的非饱和导水率<sup>[7,8,11]</sup>,现将测定的资料绘成图2。从图中可以看出:(1)在100kPa土壤吸力范围内,耕层(0—15 cm)的非饱和导水率明显大于以下各层;犁底层(15—25 cm)不仅明显小于耕层,而且在<60 kPa范围以内,也明显小于以下相邻土层(25—40 cm)。(2)非饱和导水率随着土壤吸力增大而降低,其降低的趋势,明显是以30 kPa为转折点,<30kPa时非饱和导水率急剧增高,>30kPa时非饱和导水率则较低,这对土壤的及时供水影响很大。因为对一般旱作物来说,从30kPa到100kPa吸力范围内的水分是有效度较大的水分,这部分水分移动缓慢,不能及时满足作物吸水,是造成作物容易受旱的重要原因。

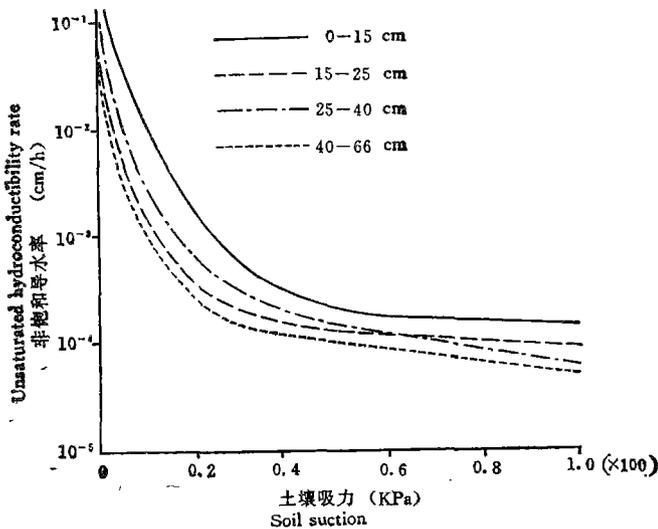


图2 砂姜黑土低吸力段的导水性能(采用稳定蒸发法测定)

Fig. 2 Hydroconductibility property of calcic concretion black soil at low suction range determined by the stable evaporation method

砂姜黑土之所以导水性能较弱,主要是由于土壤孔隙性不良所致。它不仅总孔隙度不高,而且微孔隙(孔径<0.0002mm)所占比重较大<sup>2)</sup>,尤以犁底层和心土层更为显著。

### 三、土壤毛细水上升性能

砂姜黑土由于地下水埋藏较浅(1—2.5m),土壤水分的来源除依靠降雨和灌溉外,还依靠地下水通过毛细管上升的水分子予以补给。因此毛细管上升水是砂姜黑土地区作物供水的重要来源之一。地下水补给作物供水的数量取决于土壤毛细水上升的速度和高度。为此,作者对砂姜黑土的毛细水上升性能进行了测定。测定方法:系采用深度为100cm、直

1) 沈荣开,1984: 农田地下水及土壤水盐运动试验集(未刊稿)。武汉水利学院印。

2) 根据持水曲线计算而得的当量孔隙,直径<0.0002mm的孔隙度为:耕作层15.25%,犁底层19.67%,心土层22.76%,分别占总孔隙度的29.84%、43.90%、50.11%。

径为 15cm 的原状土管柱,在其底部用自动供水装置保持固定的水位,顶部用白铁皮盖进行密封,以防蒸发;在管柱的一侧,每隔 10cm 插一支负压计,以观测毛管水上升的速度和高度。为了研究砂姜黑土的结构性和孔隙性对毛管水上升性能的影响,还同时用磨细土(磨碎后通过 1 mm 筛孔)装成的管柱进行了与原状土同样的测定。磨细土的容重,除 0—20cm 外,其余各层均比原状土略小<sup>1)</sup>

现将两种土柱的测定结果绘于图 3 和图 4。

从图 3 和图 4 可知,砂姜黑土毛管水上升的速度极其缓慢,上升高度也很小。原状土

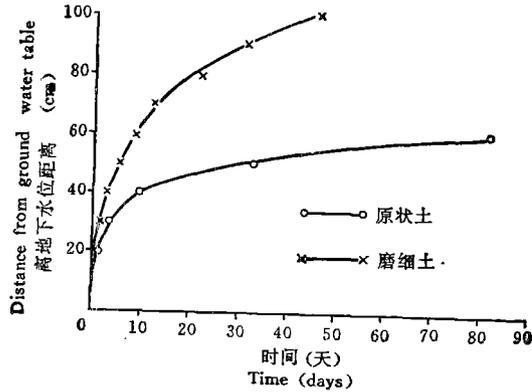
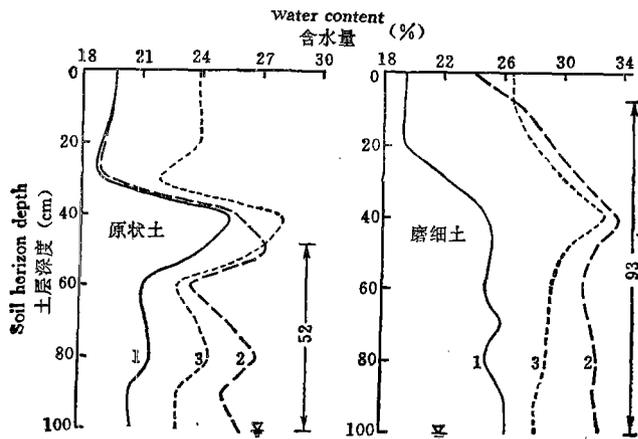


图 3 砂姜黑土毛管水上升速度

Fig. 3 The rate of capillary water rise in calcic concretion black soil



1—原始含水量 2—毛管水上升稳定后含水量 3—田间持水量

图 4 砂姜黑土毛管水强烈上升高度

Fig. 4 The strong rise height of capillary water in calcic concretion black soil

1) 原状土柱 0—20cm 的容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 和孔隙度 (%) 分别为 1.32 和 51.11, 20—100cm 的平均容重和孔隙度分别为 1.51 和 44.90; 磨细土柱 0—20cm 的容重和孔隙度分别为 1.34 和 50.37, 20—100cm 的平均容重和孔隙度分别为 1.45 和 46.90。

柱在 30 天之内只上升近 50cm, 从 50cm 上升到 60cm 则花费 50 天之久, 而且上升已近于停止。毛管水强烈上升高度仅有 52cm。而磨细土柱只用 5 天就已上升到 50cm, 从 50cm 上升到 60cm 只用 4 天时间, 40 多天就上升到 100cm。毛管水强烈上升高度达 93cm。这说明原状土经过破碎后, 破坏了原来的结构体和垒结状况, 使土壤毛细管孔隙不仅在数量上得到提高, 同时也改善了孔隙的大小分配比例, 从而增强了土壤的毛管性能。

砂姜黑土由于毛管水上升性能较弱, 故使地下水对土壤水分的补给作用产生了不利影响。从原状土柱潜水蒸发测定资料<sup>1)</sup>(表 4) 可看出在地下水埋深 0.6m 时, 砂姜黑土的日平均潜水蒸发量在 0.4 mm 以上; 而当地下水埋深增加到 1 m 时, 日平均蒸发量只有 0.05—0.19mm; 当地下水埋深增加到 1.5m 时, 日平均潜水蒸发量几乎接近于零。因此, 砂姜黑土当遇到天气干旱时, 尤其是在蒸发强烈和作物耗水较大的季节由于毛管上升远跟不上土壤上层蒸发蒸腾的损耗, 而时常出现干旱。

表 4 砂姜黑土不同地下水埋深的平均潜水蒸发量(mm/日)<sup>1)</sup>

Table 4 Evaporation capacity of groundwater in calcic concretion black soil at different groundwater tables (mm/days)

地下水埋深 Groundwater table (m)	月 份 Month												全 年 Whole year
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	1.91	2.47	2.84	3.74	4.67	6.74	4.23	5.49	4.20	2.62	2.14	2.00	3.588
0.2	1.46	1.91	2.52	3.40	4.27	5.22	4.21	4.90	3.71	2.18	2.15	1.81	3.144
0.4	0.63	0.72	0.72	0.82	1.11	1.28	1.13	1.62	1.73	1.11	0.87	0.77	1.038
0.6	0.43	0.45	0.47	0.65	0.96	0.89	0.67	0.81	0.86	0.75	0.54	0.47	0.663
1.0	0.07	0.07	0.07	0.12	0.19	0.15	0.05	0.05	0.15	0.10	0.08	0.05	0.090
1.5	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.023
2.0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	—	0.008

1) 系在未种植作物条件下的测定数据五年平均值。

根据在种植作物条件下的原状土潜水蒸发实验资料计算, 砂姜黑土不同深度地下水对小麦、大豆和夏玉米的补给量: 当地下水埋深从 1m 增加到 1.5m 时, 小麦田地下水补给量由 106.9mm 减小到 51.7mm, 减少了 51.6%; 大豆田地下水补给量由 85.8mm 减为

表 5 砂姜黑土不同深度地下水对作物的补给量(mm)<sup>1)</sup>

Table 5 Supply of groundwater to crop on calcic concretion black soil at different groundwater tables

作 物 Crop	地下水埋深 (m) Groundwater table				统计年数 Years of statistics
	0.6	1.0	1.5	2.0	
小 麦	189.8	106.9	51.7	33.7	13
大 豆	142.4	85.8	23.6	6.3	8
夏 玉 米	242.4	101.3	28.1	14.9	2

1) 系作物生长季的补给量。

1) 安徽省水利科学研究所: 安徽省淮北坡水径流观测试验资料汇编。

23.6mm, 减少了 72.5%; 夏玉米田地下水补给量由 101.3mm 减为 28.1mm; 减少了 72.3% (表 5)。这说明小麦、大豆和夏玉米对地下水的利用量, 当地下水位下降到距地面 1m 以下后则急剧减小, 降到 2m 时已极乎甚微。这显然是由于砂姜黑土毛管性能较弱所致。

#### 四、土壤水分蒸发性能

土壤蒸发性能反映着土壤的保水能力。其性能愈强, 土壤水分的非生产性消耗愈大; 反之则愈小。砂姜黑土的水分蒸发性能<sup>1)</sup>如表 6 所示, 在强烈蒸发条件下, 土层上部水分损失很快, 而下部则损失很慢。从田间持水量开始, 耕层 0—20cm, 蒸发 5 天, 土壤水分损失 19.9mm, 有效水分损失一半以上; 蒸发 10 天, 土壤水分损失 23.5mm, 占有效水分 70%; 蒸发 30 天, 土壤水分损失 35.3mm, 有效水分已全部损失殆尽。随着耕层水分的迅速损失, 干土层不断加厚, 蒸发 30 天后, 0—40cm 土层的水分损失达 41.9mm, 占有效水分 68.5%; 而 40—100 cm 的水分仅损失 2.8mm。这样, 在田间条件下, 如果地下水位降至距地面 1m 以下, 则会因下层水分向上运行缓慢, 地下水不能及时补充上层水分的损耗而至作物受旱。所以产生上述现象的原因, 主要是由于耕层和犁底层质地粘重, 结构性差, 蒸发强度大。而下部土层则由于稜柱状和稜块状结构发达, 干时产生裂缝, 切断了结构单位之间的毛管联系; 同时由于结构体表面胶膜和砂姜的存在, 也对毛细管孔隙有一定的阻隔作用, 而致水分运行极为缓慢。

表 6 在蒸发条件下砂姜黑土原状土柱中水分的丢失

Table 6 Loss of water from undisturbed soil column of calcic concretion black soil under evaporation condition

土层深度 Depth (cm)	原始储水量 <sup>1)</sup> Original water storage (mm)	其中有效水储量 Available water storage (mm)	蒸发累积量 Cumulative evaporation (mm)				占原始储水量% Percentage in original water storage				占有效水储量% Percentage in available water storage			
			蒸发历时(昼夜) Time of evaporation (days)											
			5	10	30	60	5	10	30	60	5	10	30	60
0—20	64.3	33.8	19.9	23.5	35.3	37.2	30.9	36.5	54.9	57.9	58.9	69.5	104.4	110.1
0—40	136.4	61.2	21.8	26.8	41.9	45.1	16.0	19.6	30.1	33.1	26.1	43.8	68.3	73.7
40—100	226.8	90.8	0.3	0.5	2.8	4.7	0.1	0.2	1.2	2.1	0.3	0.6	3.1	5.2
0—100	363.2	152.0	22.1	27.3	44.7	49.8	6.1	7.5	12.3	13.7	14.5	18.0	29.4	32.8

1) 即田间持水量时的储量。

从上述可知, 改善耕层土壤结构, 破除犁底层, 减弱土壤水分蒸发性能, 有利于增强土壤的保水和抗旱能力。如表 7 所示, 在蒸发过程中耕层水分的丢失量和蒸发强度, 高肥土壤(有机质含量 1.30%)明显比低肥土壤(有机质含量 0.88%)为低, 就是因前者的土壤结构比后者为好的缘故(>0.25mm 水稳性团聚体含量分别为 28.06% 和 18.07%)。

1) 实验系利用前述测定毛管水上升性能使用的原状土管柱和负压计装置, 用 25W 灯光照射, 定期记录负压计读数; 同时测定水面蒸发量, 以模拟砂姜黑土地区蒸发量最强烈时期的蒸发效应。

表 7 不同肥力砂姜黑土 (0—15 cm) 在蒸发过程中水分的丢失

Table 7 Moisture loss of calcic concretion black soils with different fertility in the process of evaporation

肥力水平 Fertility level	项 目 Item	蒸发历时(昼夜) Time of evaporation (days)					
		1	3	5	7	10	15
高 肥	土壤水分累积丢失量 (占田间持水量%)	8.05	20.43	27.11	31.83	37.98	46.44
	蒸发强度 (毫米/昼夜)	3.64	2.33	1.39	1.02	0.81	0.73
低 肥	土壤水分累积丢失量 (占田间持水量%)	9.30	25.25	32.32	37.62	43.31	51.60
	蒸发强度 (毫米/昼夜)	4.25	3.33	1.49	1.10	0.85	0.70

## 参 考 文 献

1. 安徽水利局勘测设计院、中科院南京土壤研究所, 1976: 安徽淮北平原土壤。182—192页, 上海人民出版社。
2. 陈志雄、汪仁真, 1979: 中国几种主要土壤的持水性质。土壤学报, 第16卷3期, 271—281页。
3. 庄季屏等, 1986: 土壤低吸力段持水性能及其与早期土壤干旱的关系研究。土壤学报, 第23卷4期, 306—313页。
4. 姚贤良、于德芬, 1982: 红壤的物理性质及其生产意义。土壤学报, 第19卷4期 224—236页。
5. 陈维新、张玉龙, 1987: 关于沈阳地区棕壤和草甸土水分性质的研究。土壤通报, 第18卷3期 128—130页。
6. 沈思渊、席承藩, 1990: 淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系。土壤学报, 第27卷1期, 34—42页。
7. 希勒尔(孟华、叶和才译), 1982: 土壤和水—物理原理和过程。农业出版社。
8. Cooper, J. D., 1980: Measurement of moisture fluxes in unsaturated soil in Thetford Forest. Inst. of Hydrology Walingford, Report No. 66.

## MOISTURE CHARACTERS OF CALCIC CONCRETION BLACK SOIL AND THEIR RELATIONSHIP WITH SOIL DROUGHT

Sun Huaiwen

(*Anhui Water Resources Research Institute, 233000*)

### Summary

A study on the characters of water retention, hydroconductibility, capillary rise and evaporation of calcic concretion black soil and their relationship with soil drought was carried out. The results obtained are summarized as follows:

The water retention ability of calcic concretion black soil was poor because the available water was not only low in the capacity but also smaller in the proportion at low suction range; and with the increase in soil suction the specific water capacity was sharply decreased and it had already reduced to  $10^{-7}$  ml/g · Pa at soil suction 10—30 kPa. The soil hydroconductibility property was poor and the movement of the water was very slow at soil suction >30 kPa. These showed that both the capacity and rate of water supply in the soil were unfavorable to the water supply for crops. The rate and height of capillary water rise were low, being disadvantageous to the use of the groundwater for crops. The soil water was evaporated more quickly in the upper horizon of the soil, and the water of the lower horizon moved up very slow and can't complement timely the deficit of water in root horizon. The above-mentioned characters showed that the drought resistance of calcic concretion black soil was weak, which should be the main reason for the drought of the soil.

**Key words** Calcic concretion black soil, Moisture characters, Water supply, Water conservation, Soil drought.