

温度梯度对非饱和土壤水分运动的影响*

刘思春 白锦鳞 张一平 张君常

(西北农业大学农化系, 陕西杨陵·712100)

摘要 在土壤不同含水量条件下,研究了温度梯度对非饱和土壤水分运动的影响,结果表明:在同一含水量条件下,增温可提高土壤水势,呈现黄泥巴>塬土>黑垆土的顺序;在同一含水量条件下,3种土壤在低温区及高温区均随温度梯度增加,土壤水分通量和导水率增大,但土壤导水率随温度梯度变化幅度小于土壤水分通量;温度梯度和含水量相同时,高温区土壤水分通量和导水率大于低温区;土壤水分通量及导水率呈现黑垆土>塬土>黄泥巴的顺序。同一土壤随含水量增大,土壤水分通量和导水率增加。

关键词 温度梯度,导水率,水分通量

中图分类号 S152·7,S152·8

在土壤水分运动研究中,温度的影响常被忽视,达西定律也未考虑由于温度梯度所导致的水流^[1,2],但研究表明:温度对土壤导水特性具有较大影响^[1,2],是值得关注的问题。

非饱和流是土壤中常见的水分运动方式,特别在干旱、半干旱地区更是如此。由于这些地区气温日变幅较大,相应土壤剖面中的温度梯度变异也较大,因此,在这些地区土壤水分研究中,更应重视温度梯度对土壤水分运动的影响,本文是在这方面所作的初步探讨。

1 材料和方法

供试土样为陕西省黑垆土、塬土、黄泥巴。其基本性状见表1。

表1 供试土壤基本性状

| 土壤 | 地点 | 深度(cm) | 有机质 (g/kg) | 比表面 (m ² /g) | 各级颗粒含量(粒径 mm) % | | | | |
|-----|------|--------|---------------|----------------------------|-----------------|-----------|-----------|------------|--------|
| | | | | | >0.25 | 0.25~0.05 | 0.05~0.02 | 0.02~0.002 | <0.002 |
| 黑垆土 | 陕西洛川 | 0~20 | 10.09 | 105.42 | 1.4 | 10.5 | 34.1 | 34.4 | 19.6 |
| 塬土 | 陕西杨陵 | 0~20 | 12.08 | 183.36 | 0.7 | 0.2 | 21.1 | 53.8 | 24.2 |
| 黄泥巴 | 陕西城固 | 0~20 | 8.96 | 236.27 | 3.10 | 1.9 | 20.7 | 42.0 | 32.3 |

采用直径50mm,等长(52.5mm)的两个铝合金筒,分别装入通过1mm筛孔的土样,按一定含水量(18%,21%,24%)作成两个人工土柱(把过筛风干土换算烘干土,根据需配制含水量分别求得需加入水量,喷洒拌匀,放入密封容器平衡约15d,确保土壤含水量均匀),土柱容重1.35g/cm³。土柱两端加盖密封并称重。插入水银张力计(南京土壤研究所物理室U型管式)和温度计后,将一土柱放入可控高温度容器内作为高温端,另一土柱作为低温端并与可控高温度容器一同放入恒温箱中(日本IL-82,-10°~50℃),水银U型

收稿日期:1992-09-26.

* 国家自然科学基金资助课题。

管露于控温系统外部(图1),然后调节各自所需的高温和低温(以土柱上插入温度计为准)平衡24h,读各自土柱上张力计读数,这时两土柱是同一含水量,取掉高温端和低端对接面盖子使其对接并密封,记录对接时间,观察张力计读数变化直到高温端和低温端张力计读数相同,并记录终了时间。此后从对接处断开分别加盖称其各自重量,这时高温端土柱重量减轻,低温端土柱重量增加,其增减数值为在此温度梯度下,高温端土柱流入低温端土柱的水量即流量 $Q(\text{cm}^3)$ 。

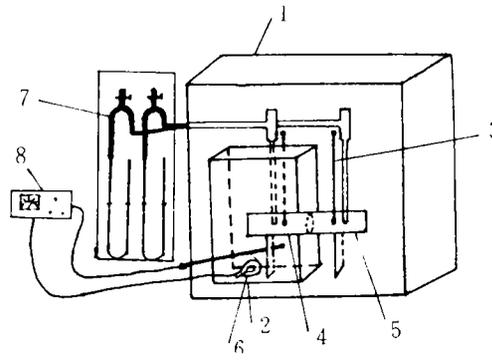


图1 实验装置示意图

- 1. 恒温箱; 2. 控高温容器; 3. 温度计; 4. 高温端;
- 5. 土柱低温端; 6. 灯泡; 7. 水银张力计; 8. 控温仪

本装置系稳流系统法测定土壤非饱和导水率,其计算公式

$$K = ql/2\Delta\tau^{(3)}$$

式中 K ——土壤导水率(cm/d); q ——土壤水分通量(cm/d); l ——水分运动距离[两土柱张力计探头间距离(cm)]; $\Delta\tau$ ——土壤水吸力差(厘米水柱高)。

$$q = q/t \cdot A$$

式中 A ——土柱横截面积(cm^2); t ——为水流通过土柱的时间(d)。

2 结果与讨论

2.1 温度对土壤水势的影响

供试土壤在一定含水量条件下,不同温度时的土壤水势如表2所示。

表2 温度对土壤水势 10^5 Pa 的影响及其相关性

| 温度($^{\circ}\text{C}$) | 黑垆土 | | | 楼土 | | | 黄泥巴 | | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 18% | 21% | 24% | 18% | 21% | 24% | 18% | 21% | 24% |
| 9 | -0.499 | -0.399 | -0.303 | -0.580 | -0.471 | -0.406 | -0.638 | -0.535 | -0.463 |
| 12 | -0.484 | -0.379 | -0.283 | -0.563 | -0.449 | -0.386 | -0.621 | -0.516 | -0.442 |
| 15 | -0.471 | -0.371 | -0.271 | -0.549 | -0.439 | -0.371 | -0.610 | -0.504 | -0.429 |
| 18 | -0.460 | -0.362 | -0.255 | -0.536 | -0.426 | -0.352 | -0.596 | -0.489 | -0.414 |
| 20 | -0.463 | -0.362 | -0.251 | -0.530 | -0.423 | -0.350 | -0.591 | -0.472 | -0.406 |
| 21 | -0.451 | -0.350 | -0.246 | -0.521 | -0.412 | -0.342 | -0.581 | -0.473 | -0.402 |
| 23 | -0.442 | -0.339 | -0.228 | -0.512 | -0.399 | -0.326 | -0.570 | -0.450 | -0.382 |
| 24 | -0.438 | -0.342 | -0.235 | -0.509 | -0.398 | -0.312 | -0.571 | -0.458 | -0.390 |
| 26 | -0.430 | -0.328 | -0.215 | -0.500 | -0.386 | -0.312 | -0.559 | -0.439 | -0.370 |
| 29 | -0.417 | -0.310 | -0.205 | -0.484 | -0.370 | -0.300 | -0.547 | -0.423 | -0.360 |
| 32 | -0.410 | -0.302 | -0.192 | -0.474 | -0.359 | -0.290 | -0.530 | -0.410 | -0.346 |
| 35 | -0.401 | -0.293 | -0.184 | -0.464 | -0.351 | -0.280 | -0.519 | -0.402 | -0.340 |
| | 0.9939 | 0.9942 | 0.9908 | 0.9982 | 0.9954 | 0.9885 | 0.9983 | 0.9942 | 0.9932 |
| B | 3.792×10^{-3} | 4.620×10^{-3} | 4.074×10^{-3} | 4.496×10^{-3} | 4.670×10^{-3} | 4.937×10^{-3} | 4.568×10^{-3} | 5.270×10^{-3} | 4.823×10^{-3} |

由表2可见,温度对土壤水势具有明显的影响,在一定的含水量时,随温度升高土壤水势升高⁽⁴⁾。在所测定的土壤含水量范围内,温度与土壤水势之间呈极显著的正相关,其相

关系数(r)在0.9885~0.9983之间($n=10$),并且其线性回归斜率(B)黑垆土<垆土<黄泥巴(24%含水量除外),说明温度对土壤水势影响(温度效应值)黄泥巴>垆土>黑垆土,表明含粘粒多的土壤温度效应相应较高^[5]。此外,由于增温可提高水势,因此而产生的温度梯度是导致土壤水分运动的重要因素^[6]。

2.2 温度梯度对土壤水分通量和导水率的影响

本研究中由于两土柱温度计距离(l)固定,即温度梯度 $\Delta T/l$ 中的 l 为定值(5cm),为更直观反映温差(ΔT)对土壤水分通量和导水率的影响,温度梯度用 ΔT 表示。同时由于同一温度梯度可在不同温度范围内出现,为进行比较本试验以同一温度梯度在不同温度范围设置了低温区和高温区。低温区是9~24℃,以9℃为起点分别与12,15,18,24℃构成梯度;高温区是20~35℃,以20℃为起点分别与23,26,29,32,35℃构成梯度;两者的温度梯度均分为3,6,9,12,15℃ 5个等级。

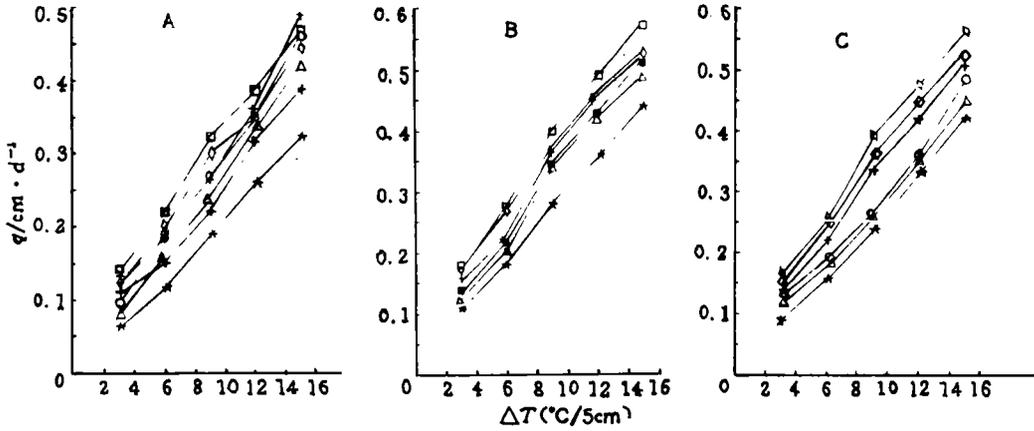


图2 土壤温度梯度对土壤水分通量影响

A. 含水量18%; B. 含水量21%; C. 含水量24%

黑垆土 ○——○ 9~24℃ 垆土 △——△ 9~24℃ 黄泥巴 ☆——☆ 9~24℃
 黑垆土 ◻——◻ 20~35℃ 垆土 ◇——◇ 20~35℃ 黄泥巴 +——+ 20~35℃

供试土壤在一定含水量,不同温度梯度时的土壤水分通量和导水率见表3,4和图2,3。从图2,3,表3,4可见,3种土壤在同一含水量条件时,在相应温区随温度梯度的增高土壤水分通量和导水率增加,若以温度梯度为15℃和3℃比较,3种土壤低温区土壤水分通量增长为3.68~5.10倍,导水率为1.13~1.25倍;高温区土壤水分通量增长为3.06~3.73倍,导水率为1.10~1.24倍。这是由于在含水量均一的土壤中,温度梯度的升高使土壤水势梯度上升,从而有利于液态水朝着温度下降的方向运动^[7]。但土壤导水率随温度梯度变化幅度明显小于土壤水分通量。这是因为导水率 K 同土壤水分通量 q 成正比,而与吸力梯度 $\frac{\Delta \tau}{l}$ 成反比,由表3,4可见,随温度梯度升高, $\frac{\Delta \tau}{l}$ 和 q 同时升高,相互抑制,导致 K 值增加较慢。但是,随温度梯度增加,导水率(K)增加的现象也表明,温度梯度对水分通量的影响大于对水势梯度的影响,可见,温度梯度不仅可增强土壤水势梯度,提高土壤水分通量,而且可通过降低土壤水分粘滞系数增强水分运动,从而导致土壤水分通量的提高。

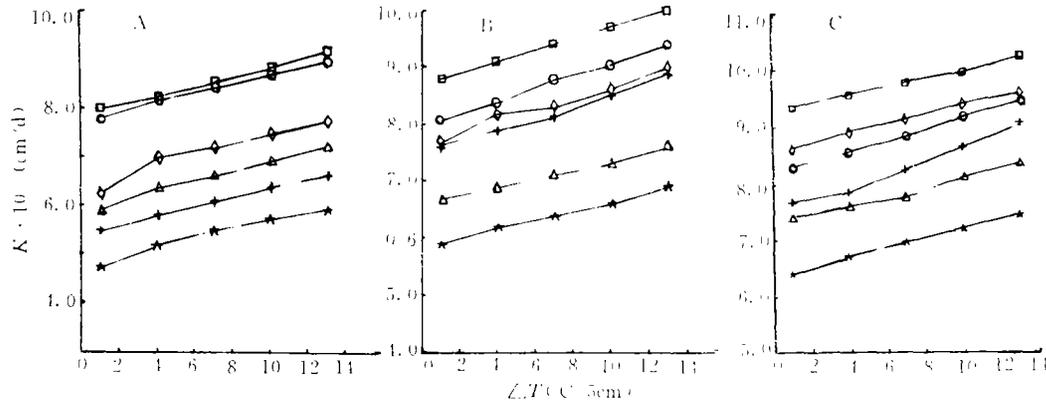


图3 土壤温度梯度对土壤导水率影响

A. 含水量18%; B. 含水量21%; C. 含水量24%

黑垆土 \square — \square 9~24°C \triangle — \triangle 20~35°C 楼土 \diamond — \diamond 9~24°C \star — \star 20~35°C 黄泥巴 \circ — \circ 9~24°C $+$ — $+$ 20~35°C

表3 温度梯度对土壤水分通量影响

cm/d

| 温度(°C) | | 温度梯度 | 黑垆土 | | | 楼土 | | | 黄泥巴 | | |
|--------|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 冷端 | 热端 | | 18% | 21% | 24% | 18% | 21% | 24% | 18% | 21% | 24% |
| 9 | 12 | 3 | 0.096 | 0.132 | 0.135 | 0.082 | 0.121 | 0.126 | 0.065 | 0.091 | 0.110 |
| | 15 | 6 | 0.187 | 0.191 | 0.222 | 0.161 | 0.179 | 0.210 | 0.119 | 0.157 | 0.186 |
| | 18 | 9 | 0.269 | 0.265 | 0.346 | 0.236 | 0.259 | 0.340 | 0.189 | 0.239 | 0.283 |
| | 21 | 12 | 0.350 | 0.361 | 0.427 | 0.332 | 0.352 | 0.421 | 0.262 | 0.332 | 0.355 |
| | 24 | 15 | 0.458 | 0.486 | 0.514 | 0.418 | 0.452 | 0.490 | 0.323 | 0.424 | 0.442 |
| 20 | 23 | 3 | 0.141 | 0.162 | 0.175 | 0.126 | 0.150 | 0.172 | 0.109 | 0.136 | 0.157 |
| | 26 | 6 | 0.222 | 0.250 | 0.279 | 0.200 | 0.243 | 0.274 | 0.151 | 0.219 | 0.229 |
| | 29 | 9 | 0.321 | 0.389 | 0.399 | 0.300 | 0.358 | 0.373 | 0.221 | 0.335 | 0.365 |
| | 32 | 12 | 0.382 | 0.475 | 0.486 | 0.347 | 0.445 | 0.461 | 0.317 | 0.416 | 0.453 |
| | 35 | 15 | 0.464 | 0.562 | 0.572 | 0.445 | 0.523 | 0.527 | 0.386 | 0.507 | 0.519 |

表4 温度梯度对土壤导水率的影响

$\times 10^{-3}$ cm/d

| 温度(°C) | | 温度梯度 | 黑垆土 | | | 楼土 | | | 黄泥巴 | | |
|--------|----|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 冷端 | 热端 | | 18% | 21% | 24% | 18% | 21% | 24% | 18% | 21% | 24% |
| 9 | 12 | 3 | 7.80 | 8.08 | 8.27 | 5.90 | 6.70 | 7.40 | 4.74 | 5.90 | 6.43 |
| | 15 | 6 | 8.18 | 8.36 | 8.54 | 6.38 | 6.90 | 7.60 | 5.20 | 6.20 | 6.71 |
| | 18 | 9 | 8.45 | 8.78 | 8.83 | 6.60 | 7.14 | 7.74 | 5.50 | 6.40 | 6.95 |
| | 21 | 12 | 8.73 | 9.03 | 9.18 | 6.93 | 7.33 | 8.10 | 5.73 | 6.62 | 7.20 |
| | 24 | 15 | 9.00 | 9.37 | 9.44 | 7.24 | 7.64 | 8.35 | 5.94 | 6.94 | 7.42 |
| 20 | 23 | 3 | 8.00 | 8.80 | 9.30 | 6.24 | 7.70 | 8.60 | 5.50 | 7.60 | 7.68 |
| | 26 | 6 | 8.24 | 9.08 | 9.54 | 7.00 | 8.20 | 8.90 | 5.82 | 7.90 | 7.84 |
| | 29 | 9 | 8.55 | 9.38 | 9.74 | 7.20 | 8.30 | 9.10 | 6.10 | 8.14 | 8.23 |
| | 32 | 12 | 8.83 | 9.70 | 9.91 | 7.50 | 8.60 | 9.38 | 6.40 | 8.50 | 8.64 |
| | 35 | 15 | 9.17 | 9.98 | 10.02 | 7.74 | 9.00 | 9.54 | 6.64 | 8.90 | 9.06 |

从表3,4还可看出,3种土壤在同一含水量和温度梯度条件下,高温区土壤水分通量和导水率均明显大于低温区。例如,黑垆土含水量21%,温度梯度都是 $12^{\circ}\text{C}/5\text{cm}$,低温区 $q=0.361\text{cm/d}$, $K=9.03\times 10^{-3}\text{cm/d}$;高温区 $q=0.475\text{cm/d}$, $K=9.70\times 10^{-3}\text{cm/d}$,其原因由表2分析可见,低温区($9\sim 21^{\circ}\text{C}$)温度效应($0.399\sim 0.350/12$)为 4.08×10^{-3} ;而高温区($20\sim 35^{\circ}\text{C}$)温度效应($0.362\sim 0.302/12$)为 5.00×10^{-3} ;其他情况亦相同,显然高温区温度效应大于低温区。即相同含水量条件下,同一温度梯度所导致的土壤水势梯度是高温区大于低温区,因而高温区由高温端土壤水势大向低温端土壤水势小方向运动的水量大于低温区同一过程的水量。同时由表3,4可见,在相同含水量和温度梯度条件下,比较3种土壤其水分通量和导水率均为黑垆土>埧土>黄泥巴,这与3种土壤粘粒含量的顺序正好相反,表明在试验条件下,质地较粗的土壤温度梯度对导水性的影响较大,这可能与质地较粗土壤毛管性好和对水分吸附力较弱有关^(5,8)。

此外,由表3,4可见,同一土壤随含水量增大,土壤水分通量和导水率也增大,这与一般结论相符⁽⁸⁾。

总之,本试验表明温度不仅能提高土壤水势,而且温度梯度对非饱和导水性具有明显影响,在研究土壤水分运动中是值得考虑的重要影响因素之一。

参 考 文 献

- 1 Giakoumakrs S G, Tsakiris G P. Eliminating the effect of temperature from unsaturated soil hydrating functions. *Journal of Hydrology*, 1991, 129: 109~125
- 2 Hopmems J W, Dane J H. Effect of temperature-dependent Hydraulic properties on Soil water Movement *Soil Sci Soc, Am J* 1985, 49: 51~58
- 3 陈志雄,于德芬. 稳定流法测定土壤非饱和导水率. 重庆全国土壤物理专业委员会学术会交流资料, 1989
- 4 张一平,白锦麟,张君常等. 温度对土壤水势影响的研究. *土壤学报*, 1990, 27(4): 454~458
- 5 袁剑舫,周月华. 水分运行与土壤质地的关系. *土壤学报*, 1964, 12(4): 143~153
- 6 易福华. 地膜内由温度梯度引起的土壤水分运动及其应用. *中国农业科学*, 1988, 21(1): 27~31
- 7 [澳]T J 马歇尔, J W 霍姆斯著. 土壤物理学. 北京: 科学出版社, 1986
- 8 方正三. 非饱和土壤水分的能量关系、可利用性及其运动. *科学通报*, 1964, (4): 306~315

Effect of Temperature Gradient on Unsaturated Soil Water Transport

Liu Shichun Bai Jingling Zhang Yiping Zhang Junchang

(The Department of Soil and Chemical Department, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract This paper deals with the effect of temperature gradient on unsaturated soil water transport. The results showed that water potential was improved with an increase in temperature under the same conditions of water contents, appearing to be in the following orders: Yellow cinamon soil>Lou soil>Black lou soil. Under the same water contents of three kinds of soils in the low temperature zone and the high temperature

zone, soil water flux and soil hydraulic conductivity increased with temperature rising, but soil hydraulic conductivity was smaller than water flux with a variation in water gradient; Water flux and hydraulic conductivity in the zone of high temperature were greater than those in the zone of low temperature when the temperature gradient and water contents were the same. Water flux and hydraulic conductivity of soils appeared to be in the following orders: Black lou soil > bou soil > Yellow cinnamon soil. Water flux and hydraulic conductivity increased with an increase in water contents.

Key words Temperature gradient, hydraulic conductivity, water flux