

# 冬小麦根系生长与土壤水分利用方式相互关系分析

冯广龙 刘昌明

(中国科学院地理研究所 北京 100101)

**提 要** 1995~1996 年在中国科学院栾城农业生态系统联合站布置了冬小麦水分试验, 在土壤连续干旱条件下考察了冬小麦返青至成熟阶段根系生长和土壤水分利用方式。给出并验证了可用于分析二者相互关系的定量模型。根据以下两点分析了作物利用土壤水分特征: ①将土壤含水量开始降低时间视为吸水峰到达某一深度时间; ②吸水峰下达到某一土层后, 土壤含水量即随生育进程以指数形式逐渐降低。

愈接近地表的土层, 根系分布量愈大, 根系日增长率在抽穗期最大, 至扬花期根量及根深达最大值, 根系吸水范围和深度基本取决于营养阶段根系生长发育状况。返青时, 根系已下扎到 1m, 根系生长峰与吸水峰基本同步下移, 根系下扎到某一土层后继续生长发育, 直至土壤有效含水量只剩 40%~20%时为止。根系下扎虽深达 180cm, 而且下层根系吸水功能较强, 有效水量较大, 但终因根系分布量太少, 致使作物利用水分的土层深度只达 120cm, 吸收的水量大多来自 0~60cm 土层。

在土壤连续干旱条件下, 土壤水分不足亦是制约根系吸水功能的一个重要因素。在作物利用土壤水分初期, 根系吸水速率最大, 随着土壤含水量逐渐减少, 根系吸水速率随之降低。土壤中有效含水量比例在 0.8 以上, 根系吸水速率大致以线性关系大幅度降低。

**关键词** 根系 土壤水分利用方式 水分胁迫 冬小麦

**分 类** 中图法 S512.1

## 1 引 言

作物对各土层水分的利用状况取决于土层中根系分布量、根系吸水速率及有效含水量。无论土壤水分是否充足, 根系在作物吸水过程中都起着非常重要的作用, 它决定着作物吸水区域、吸收各土层水分开始及持续时间, 并控制着吸水速率在土壤剖面中的相对强度, 尤其在土壤干旱条件下, 根系作用更大。根系吸水量能否满足作物蒸腾需水量, 直接关系到水分是否会限制作物生长以及制约的程度。根系生长特征与利用土壤水分方式之间关系的深入探讨, 有助于安排避免或缓减作物遭受水分胁迫的农艺栽培措施, 可为农业节水增产实践提供有效的理论指导。二者间相互关系的精确定量表达, 对于提高作物生长模型模拟精度是至关重要的。

近年来对根系生长与吸水之间动态关系的了解仍相当有限<sup>[1]</sup>, 有许多问题仍需进一步查清。如, 根系下扎与吸水深度究竟有何关系, 有研究表明, 在严重水分胁迫条件下, 受旱作物成熟时, 剖面下部仍有大量极易被作物利用的水分<sup>[2]</sup>, 究竟是根系伸展范围不足以完全快速利用这些有效水分呢<sup>[3]</sup>? 还是尽管根系发育庞大, 从理论上讲足以吸收全部有效水分, 对土壤水分利用状况较差是由于有效根系吸水功能较弱所致<sup>[4]</sup>? 在干旱条件下, 限制作物利用土壤水分的原因尚需进一步查清。现有相关研究大多认为, 根系生长与吸水间呈非线性正相关关系<sup>[5]</sup>, 也有研究认为, 水分吸收不一定与根系分布有关, 作物吸水量与根长密度关系不大, 而更多依赖于扎根深度<sup>[6]</sup>。有些研究甚至得出根长密度与吸水速率呈非线性反比关系<sup>[7]</sup>。可见, 仍有必要进一步考察根系生长与吸水之间的定量关系。

## 2 材料与amp;方法

本试验在中国科学院河北栾城(37.8°N, 114.7°E, 海拔 50.1m)农业生态系统联合站进行, 该站是华北太行山山前平原高产农区的典型代表性区域, 年平均降水量 400~500mm, 主要集中于夏季, 地下水位在 27m 以下; 土壤质地为壤质褐土, 1m 土体平均田间持水量为 34.6%(容积含水量), 平均容重为 1.45g/cm<sup>3</sup>。

试验布置于水分试验场内, 历年施肥水平一致, 前茬为夏玉米。供试小麦品种为 5018, 于 1995-10-07 播种, 播量为 375kg/hm<sup>2</sup>, 平均行距 15.43cm, 翌年 6 月 12 日收获。试验设置水分处理包括 3 个重复, 随机布置。小区面积为 48m<sup>2</sup>(6×8m), 小区间及四周均有 2m 宽保护行。在冬小麦全生育期内, 只灌了一次 60mm 越冬水, 超过 10mm 降水仅 2 次, 即 1996-04-28(11.2mm)和 1996-05-26(30.2mm), 属偏早型, 最大降雨量发生在冬小麦生长末期, 故降雨对本水分试验影响不大。

0~20cm 土壤湿度用取土烘干称重法测定, 20cm 以下每隔 20cm 用中子水分仪测定, 灌溉及降雨前后加测。根长密度用内径为 7.6cm 根钻每隔 10cm 取样后, 置于容器中, 浸泡 10~12h 后, 冲洗泥土并用 0.15mm 筛过滤, 洗净检出杂质和死根后, 用网格交叉法测定。每次在剖面下部所取根样中, 仔细检查白细微曲且有别于断根的根尖, 以确定根深。

## 3 结果与分析

### 3.1 作物利用土壤水分方式的定量分析方法

在作物生长所需水分完全来自于土壤, 且需水强度总是超过供水强度的环境条件下, 随着根系下扎, 作物吸水峰不断下移。各土层含水量在根系到达之前基本保持不变, 一旦根系下扎到某一土层, 作物便开始利用该层水分, 土壤含水量以指数形式逐渐降低<sup>[8]</sup>。Passioura(1983)将土壤连续干旱条件下含水量这种动态变化概化为以下函数形式<sup>[4]</sup>:

$$\theta = \theta_u \quad t \leq t_c \quad (1)$$

$$\theta = \theta_l + \theta_a \cdot \exp[-kl(t - t_c)] \quad t > t_c \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为土壤含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\theta_u$  为各土层初始有效含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\theta_l$  为萎蔫点土壤含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\theta_a$  为根系能够从土层中吸收的最大有效含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $kl$  为吸水常数, 表示作物每天从土壤中吸收的有效水比例(/d);  $l$  为根长密度(cm/cm<sup>3</sup>);  $k$  是与水力传导度有关的常数(cm<sup>2</sup>/d);  $t_c$  为含水量开始下降的时间;  $t - t_c$  为含水量以指数形式降低所持续的时间。 $t_c$ 、 $kl$ 、 $k$  及  $\theta_a$  均是土壤深度的函数。各土层  $\theta$  是否会降至  $\theta_l$  取决于土壤干旱期和作物吸水持续时间长度及根长密度大小。

将式(2)求导可得出如下吸水速率(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>\*d)方程:

$$-d\theta/dt = kl \cdot \theta_a \cdot [-kl(t - t_c)] \quad (3)$$

当  $t = t_c$  时,  $\theta = \theta_u$ , 吸水速率最大, 记为:

$$\theta_{max} = kl \cdot (\theta - \theta_l) \quad (4)$$

将式(3)等式两边除以 1, 可得出如下计算单位根长吸水速率  $q$ (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>\*d)方程:

$$q = k \cdot (\theta - \theta_l) \quad (5)$$

本试验在冬后冬小麦生长季内未进行补充灌溉, 接纳降雨量很少, 冬小麦生长所需水分几乎完全来自于土壤有效贮水量。图 1 显示了从开春至收获不同土层含水量随冬小麦生育进程的动态变化过程, 由图可见, 本试验完全遵从 Monteith(1986)<sup>[8]</sup>所述的受旱作物利用土壤水分的普遍特征, 符

合式(1)、(2)所提供的模型。由于冬小麦需经历漫长越冬过程，中间未监测土壤水分动态，将冬后各层土壤含水量视为  $\theta_u$ ，因根系已下扎到一定深度，作物利用土壤水分方式的线性过程不太明显，很快便转入指数阶段。若从播种开始分析，特别是对于无越冬过程的作物，用式(1)、(2)模型分析其利用土壤水分方式，效果会更好。有些研究用该模型分析了种植在许多土壤类型上的高粱、大麦、水稻等作物利用土壤水分方式及根系生长和吸水关系，均得到了比较满意的结果<sup>[1, 9~11]</sup>。

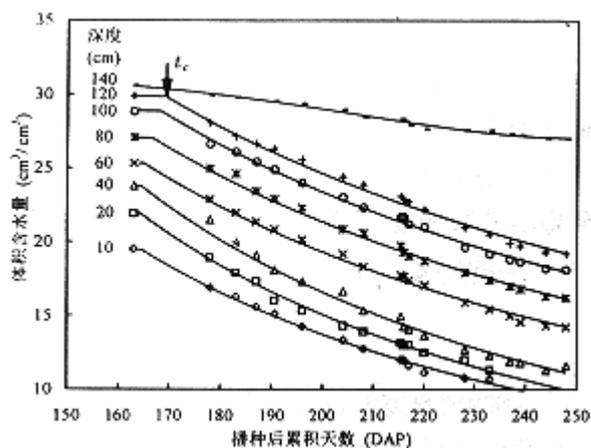


图1 旱作麦田不同土层体积含水量变化动态及其指数拟合曲线

Fig.1 Change dynamics of soil water content at different layers of nonirrigation treatment with fitted exponential curves to indicate the time when roots start extracting water

### 3.2 根系生长和利用土壤水分方式的相互关系

由图2可见，愈接近地表的土层，根系分布量愈大，根长密度( $\rho$ )随深度下降逐渐降低。根系下扎到某一土层后， $\rho$ 并不恒定，而是动态变化的，自返青后，各层 $\rho$ 逐渐增大，至扬花期(217d)达最大值，之后，由于冬小麦生长重心逐渐转移到生殖生长，根系衰亡速率大于生长速率， $\rho$ 趋于下降。所有土层根系日增长速率在208~217d(抽穗期)最大，为0.013~0.04cm/cm<sup>3</sup>\*d，灌浆期根系衰亡速率最大，成熟时，与扬花期最大值相比，根量减少了近一半。由此可知，根系吸水范围及深度基本取决于营养生长阶段根系生长分布状况。一旦土壤中有效含水量比例(FEW)降至0.4~0.2时，根系生长便受到抑制，在剖面各土层中均可观察到这一特征(图3)，在旱作高粱研究中也曾有类似报道<sup>[10, 12]</sup>。Merrill等(1979)指出，土壤干旱限制根系生长发育是由于引起土壤强度增加所致<sup>[13]</sup>。说明阻碍根系生长的土壤强度与20%~40%FEW具有特定的对应值。

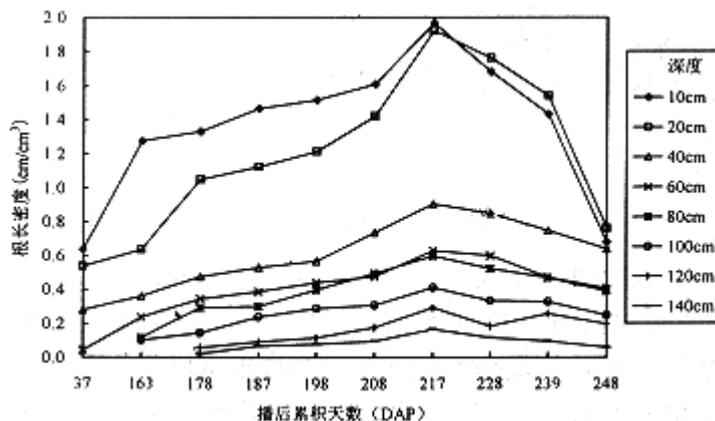


图2 不同土层冬小麦根长密度变化过程

Fig.2 Change in root length density of winter wheat at different layers under continuous soil drying in the field

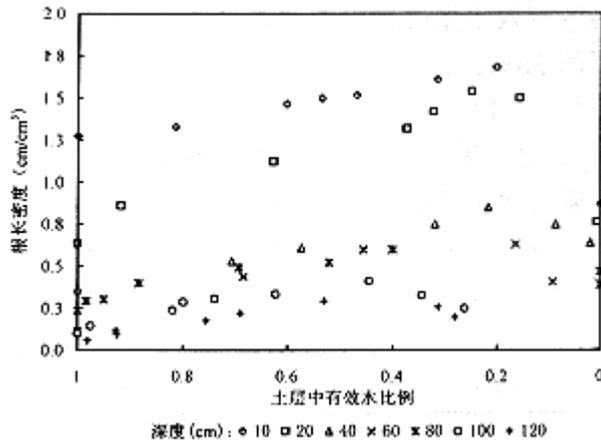


图3 各土层中根长密度与土壤中仍存留的有效水比例间关系

Fig.3 root length density in relation to the fraction of extractable water in different layers of nonirrigation treatment

图4和图5分别显示了根系生长峰和吸水峰下移动态。经统计回归分析，得出如下两个拟合方程：

$$RD_r = 0.005628 + 2.3501t_r - 4.5548t_r^2 + 3.2148t_r^3 \quad R^2 = 0.9487 \quad (6)$$

$$ED = 40.69DAP - 6658.4 \quad R^2 = 0.9706 \quad (7)$$

式中， $RD_r$ 为相对扎根深度，表示当时扎根深度与最大扎根深度之比； $t_r$ 为相对时间，表示当时播后天数(DAP)与根系达到最大深度天数(DAP)之比；ED为吸水峰下移深度。

比较好的土壤水分模拟预报和灌溉规划模型，一般均需要根系下扎深度随时间动态变化方面的信息，根据以往试验结果和相关经验，只要得知根系下扎的最大深度和时间，即可通过式(6)预测类似条件下不同时间根系下扎深度。本试验表明：返青后，由于根系在播后163d已下扎到1m(图4)，由式(7)可见，吸水峰下移速度极快，高达40.69cm/d，吸水峰只比根系生长峰滞后0.64d，冬小麦自利用表层土壤水分近3d后便从100~120cm土层吸收水分(图4、5)。说明根系一旦伸展到某一层次，作物随即便开始利用该层水分。约至180d，冬小麦利用土壤水分的最大深度只达到了140cm。起身时，尽管120~150cm土层贮积了71mm有效水量，但截止成熟，土层中占吸水初期的有效水比例仍高达83%，只吸收了该层11mm水量。冬小麦耗水基本来自120cm以上土层，在163~248d之间，从0~120cm土层利用的水量高达130mm。由于土表蒸发及根系吸水，收获时，0~20cm表层 $\theta$ 已降至萎蔫点 $\theta_1$ 以下，40cm以下土层 $\theta$ 仍处于 $\theta_1$ 之上，贮积的水量未被完全利用。根系于217d(扬花期)已达到最大深度(180cm)，表明并非是由于根系下扎深度不够，无法吸收深层水分。

Barraclough(1988)研究指出，具备吸水能力的根量阈值为 $1.0\text{cm}^3$ ，低于此值，即使土体有效水量较高，也无法充分利用<sup>[14]</sup>。130~150cm土层根系稀少，大部分时间在 $0.2\text{cm}^3$ 左右，全生育期最大根长密度也只有 $0.3737\text{cm}^3$ ，只占0~150cm总根长的4.5%(图4)，吸水效率为1.627，只相当于0~100cm土层根系平均吸水效率的10%<sup>[15]</sup>。成熟时，作物从各土层中所利用的有效水量占初始

有效含水量比例( $\theta_e$ ), 由0~10cm 土层的 100%渐降至 100~120cm 土层的 36%, 120~140cm 土层仅达 10%(表 1), 此层土壤含水量在冬小麦主要生育期内变化很小(图 1)。

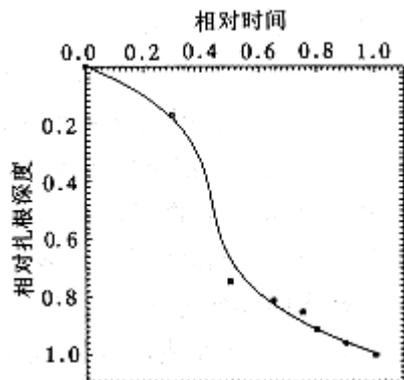


图 4 冬小麦根系下扎深度变化动态及其拟合曲线

Fig.4 Change in rooting depth with time for winter wheat and plotted on a normalized scale

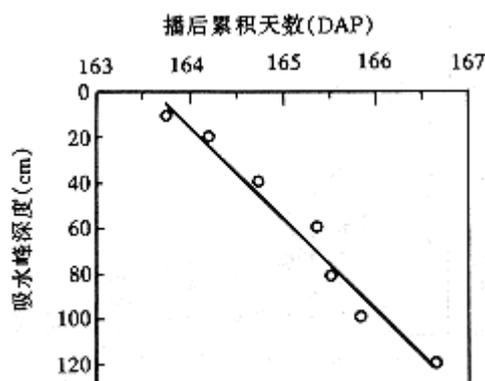


图 5 返青后冬小麦根系吸水峰下移动态

Fig.5 Progress of the water extraction front with time after regreening of winter wheat under continuous

$k_l$  表示吸水常数, 可视为作物每天从土壤中吸收的有效水比例。由表 1 可见,  $k_l$  随深度下降呈递降趋势, 不同土层  $k_l$  变幅在 0.07~0.18/d, 冬小麦在 60cm 以上吸收的有效水比例( $k_l$ )较大, 是冬小麦吸收土壤水分的主要层次。在 60cm 以下,  $k_l$  变化甚微, 只有 0.07~0.08/d。  $k_l$  变化是由  $k$  和  $l$  变化所致。  $k$  是与土—根系统水流扩散率有关的一个常数, 对于某一区域特定土壤类型而言, 在作物不同生长季内, 各土层  $k$  值应为恒值。土层愈深,  $k$  值愈大(表 1), 由式(5)可知, 根系的单位根长吸水速率  $q$  相应也愈大。可见, 根系不同部位的吸水速率是不同的, 因此, 在相关模型中处理类似问题时, 对于不同土层  $q$  不应总是被假定为一个恒定常数。以上说明, 愈靠近根系下部,  $q$  值愈大(图 6), 这可能是由于下部根系根龄较小, 活性大, 土壤含水量较高所致。但由于下部土层根系分布量较少(图 2), 根系绝对吸水量及吸水效率还是剖面上部土层较大(表 1)。影响根系吸水速率的因素是多方面的, 包括大气、土壤及作物三大因素。对于没有外源补水的旱作冬小麦而言, 由于大气蒸发力较强, 冬小麦起身后, 蒸腾需水量经常超过根系供水量, 根系总是最大限度地克服土壤阻力, 尽快地吸收土壤水分以满足作物蒸腾需求, 因此, 土壤水分状况便成为制约根系吸水速率的一个决定性因素。图 1 及图 6 所显示的各土层含水量与根系吸水速率  $q$  动态变化大小分布的一致性表明, 上部土层含水量较少是冬小麦根系吸水速率较低的一个主要原因。就某一土层而言, 随着生育进程土

壤含水量被作物不断利用，根系吸水速率逐渐降低(图 6)。

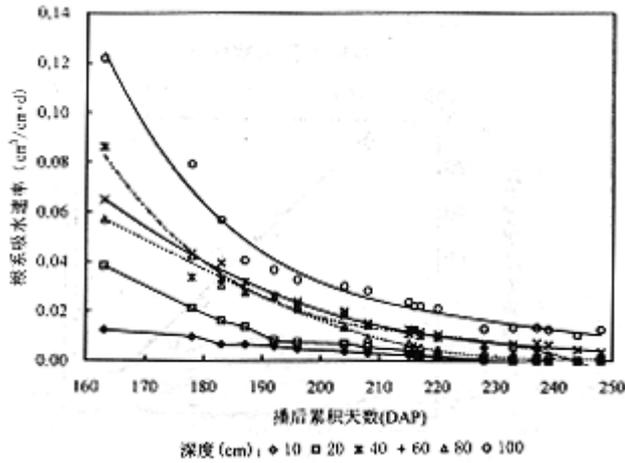


图 6 不同土层单位根长吸水速率随生育进程变化过程

Fig.6 Change in extraction rate per unit root length with time at each layer of the nonirrigation treatment

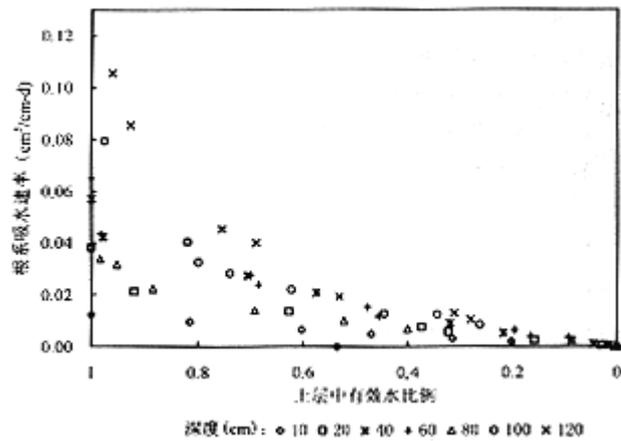


图 7 各土层中根系吸水速率与有效水比例之间关系

Fig.7 Extraction rate per unit root length in relation to the fraction of extractable water in each layer of nonirrigation treatment

表 1 各土层模型参数及土壤水分利用状况

Table 1 The parameters of the model and status of soil water extraction in each layer

项目	深度 (cm)							
	10	20	40	60	80	100	120	140
kl(d)	0.1601	0.1827	0.1657	0.1291	0.0804	0.0765	0.0740	
k(cm <sup>2</sup> /d)	0.1205	0.1623	0.2774	0.3144	0.2509	0.3459	0.5528	
θ <sub>max</sub> ×100(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ·d)	1.58	2.42	2.06	1.53	0.96	1.14	1.24	
θ <sub>e</sub>	1	1	0.5884	0.5135	0.4675	0.4312	0.3548	0.1

图7单位根长吸水速率 $q$ 与FEW关系表明,各层最大吸水速率峰值均出现在吸水初期,为 $0.01\sim 0.12\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{d}$ ,大部分位于 $0.03\sim 0.06\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{d}$ 之间。 $q$ 随土壤含水量不断减少而降低。FEW在0.8以上, $q$ 随FEW大致以线性关系大幅度降低,之后,随着土壤含水量逐渐减少, $q$ 降低趋于平缓,以往有些研究也得出过与此一致的结论<sup>[7, 16]</sup>。图7同时也证实了Passioura(1983)所概化的在需水大于供水强度条件下土壤含水量动态变化的指数模型。

据Gardner(1964)<sup>[17]</sup>单根吸水模型理论推导得出,单位根长吸水速率( $q$ )与根长密度( $l$ )关系为 $q=l^a$ , $a\in[0.5, 2.2]$ ,利用本试验数据,经统计相关分析,得出如下拟合方程:

$$q=0.044\ 020\ 7l^{1.765\ 1} \quad R^2=0.892\ 7, n=16 \quad (8)$$

说明根长密度( $l$ )与根系吸水量基本呈正相关关系。

#### 4 结 论

本文所给出的理论框架和模型,经验证,可较好地用于分析在需水大于供水强度条件下作物根系生长与土壤水分利用方式之间的相互关系。利用该模型易于考察扎根深度和吸水峰下移之间的相互关系,便于确定作物利用各层水分的起始时间,利于探讨和分辨限制作物利用土壤水分的原因,较易于识别是扎根浅、根量少、功能弱,还是作物吸水时间短,有效水量少诸如之类可能导致作物利用水分较差的因素。该方法适宜于从作物生长初期开始分析在大气蒸发力超过供水强度环境条件下,只依赖于土壤水分生长的旱作作物在全生育期内利用土壤水分状况和方式。

虽然下层土壤有效含水量较高,冬小麦利用深层水分则较少,这并不是由于根系下扎深度不够、吸水持续时间太短或根系吸水功能较弱,而是由于根量分布太少所致。因此,在提倡储量灌溉和促使根系利用深层水分的节水增产措施中,在诱导根系深扎的同时,更应重视促使根系在深层大量发育。

#### 参考文献

- 1 Robertson M J, Fukai S, Ludlow M M et al. Water extraction by grain sorghum in a subhumid environment. II. Extraction in relation to root growth. *Field Crops Res*, 1993, 33: 99~112
- 2 Hamblin A. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv Agron*, 1985, 38: 95~158
- 3 Taylor H M. Modifying root systems of cotton and soybean to increase water absorption. In: Taylor H M, Jordan W R, Sinclair T R eds. *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, 1984, 57~64
- 4 Passioura J B. Roots and drought resistance. *Agric Water Manag*, 1983, 7: 265~280
- 5 Molz F J, Remson I. Application of an extraction-term model to the study of moisture flow to plant root. *Agron J*, 1971, 63: 72~77
- 6 Ehlers W, Hamblin A P, Tennant D. Root system parameters determining water uptake of field crops. *Irrig Sci*, 1991, 12: 115~124
- 7 Meyer W S, Barrs H D. Roots in irrigated clay soil: measurement techniques and responses to rootzone conditions. *Irrig*

Sci, 1991, 12: 125~134

- 8 Monteith J L. How do crops manipulate water supply and demand. *Phil Trans R Soc London A*, 1986, 316: 245~289
- 9 Lilley J M, Fukai S. Effects of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars. I. Rooting pattern and soil water extraction. *Field Crops Res*, 1994, 37: 205~213
- 10 Robertson M J, Fukai S, Ludlow M M et al. Water extraction by grain sorghum in a subhumid environment. I. Analysis of the water extraction pattern. *Field Crops Res*, 1993, 33: 81~97
- 11 Thomas, Fukai S, Hammer G L. Growth and yield response of barley and chickpea to water stress under three environments in southeast Queensland. II. Root growth and soil water extraction pattern. *Aust J Agric Res*, 1995, 46: 35~48
- 12 Blum A, Arkin G F. Sorghum root growth and water use as affected by water supply and growth duration. *Field Crops Res*, 1984, 9: 131~142
- 13 Merrill S D, Rawlins S L. Distribution and growth of sorghum roots in response to irrigation frequency. *Agron J*, 1979, 71: 735~745
- 14 Barraclough P B, Weir A H. Effects of a compacted subsoil layer on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of winter wheat. *J Agric Sci*, 1988, 110: 207~216
- 15 冯广龙, 刘昌明. 人工控制土壤水分剖面调控根系分布的研究. *地理学报*, 1997, 52(5): 461~469
- 16 Taylor H M, Klepper B. The role of rooting characteristics in the supply of water to plants. *Adv Agron*, 1978, 30: 99~128
- 17 Gardner W R. Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron J*, 1964, 56: 41~45

## **ANALYSIS OF ROOT SYSTEM GROWTH IN RELATION TO SOIL WATER EXTRACTION PATTERN BY WINTER WHEAT UNDER WATER-LIMITING CONDITIONS**

**FENG Guang-long LIU Chang-ming**

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract** An experiment was conducted under continuous drying conditions in the field to examine root system growth in relation to water extraction pattern by winter wheat from 1995—1996 at Luancheng Experimental Station of Agricultural Ecosystems, Chinese Academy of Sciences which is located in the North China Plain. A model for analyzing the relationship between soil water extraction and root growth was put forward and verified. Extraction was analysed in terms of two components: (a) the time when the extraction front reaches a particular depth is defined as the moment when soil water content( $\theta$ ) begins to decline exponentially with time, and (b) the decline of  $\theta$  with time occurs at each depth after the extraction front arrives.

Root length density declined gradually with depth, the period of fastest growth of root occurred after early head before anthesis and root length in each layer reached a maximum during flowering stage. The effect of soil water on root growth was little after anthesis, which implies that the depth and volume of soil water extraction by winter wheat mainly rely on the root length accumulation and downward penetration during vegetative phase. The root front penetrated down to 100cm deep

before jointing, thereafter the extraction and growth of root fronts descended together. Once the root front arrived at a given depth, root proliferation continued until about 40%—20% of extractable water in the layer remained. Although the maximal depth of root front penetration was up to 180cm, the ability of water uptake by root was strong and the amount of soil water available to winter wheat was much more in the lower layers, yet as the distribution amount of root system was too less that the extraction front could only arrive at 120cm, and most amount of water required by winter wheat come from 0—60cm layer.

Under soil continuous drying condition, the deficiency of soil water was one of the important factors which restricted the ability of water extraction by root. The peak of extraction rate per unit root length ( $q$ ) occurred near the beginning of extraction each layer. As soil dried,  $q$  declined substantially in approximate linear relationship with the fraction of extractable water (FEW) as FEW was more than 0.8.

**Key words** roots system, water extraction pattern, water stress, winter wheat