维普资讯 http://www.cqvip.com

第19卷第1期
1999年1月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 19, No. 1
Jan., 1999

土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究*

冯广龙①
(中国科学院地理研究所禹城综合试验站 北京 100101)
罗远培②
(中国农业大学资源环境学院土壤和水科学系 北京 100094)

摘要 利用已建立并经充分验证过的根、冠系统模拟模型,研究了不同土壤水分条件下根、冠之间消长关系。给出了不同1m土体贮水量波动情况下根冠比动态变化模拟结果,并提供了有关试验数据作为佐证。其中有些结论为常规试验不易得到的全新认识,有些结果支持并证实了以往有关结论,均为水分对作物生长实施调控提供了重要依据。

关键词 根、冠关系,土壤水分,冬小麦。

SIMULATION ON FUNCTIONAL EQUILIBRIUM OF WINTER WHEAT ROOT AND SHOOT UNDER DIFFERENT SOIL WATER REGIMES

FENG Guang-Long
(*Yucheng Experiment Station, Institute of Geography, CAS, Beijing, 100101, China*)
LUO Yuan-Pei
(*Department of Soil and Water Science, Chinese Agricultural University, Beijing, 100094, China*)

Abstract The root-shoot relationships under different soil water regimes were studied by the established simulation model of root-shoot system which had been tested widely. The change characteristics of root-shoot ratio with the fluctuation of storaged water in 1m depth soil provide some new knowledge which are difficult to obtain by usual experiment and the others supported the past results. The simulation results are compared with the relevant experimental results. All of these results are the important basis for controlling and regulation crop growth by soil water.

Key words relations of root and shoot, soil water, winter wheat.

---

* 本文得到中国科学院"九五"重大项目(KZ95T04-01)及国家重大自然科学基金项目资助。

1) 冯广龙,土壤水分对根、冠系统影响的试验与模拟验究。北京农业大学博士论文,1995。

① 现地址:中国科学院地理研究所水文室,北京 100101;② 现地址:中国农业科学院气象研究所,北京 100081

收稿日期:1996-09-07,修改稿收到日期:1998-04-05。

维普资讯 http://www.cqvip.com

以作物为中心的农田节水调控措施应是解决粮食和缺水问题最长期有效的一条途径。以往国内外围绕这一内容开展了大量工作，总体而言，大多偏重于作物体内微观反应过程、内部具体变化机制及水分胁迫对作物某一器官或组织的直接损伤效应和后果，对作物整体性研究则显得相当薄弱。鉴于此，许多学者提出从作物整体出发，在器官水平上研究作物在不同水分条件，特别是水分胁迫条件下综合反应特征及规律的重要性[1]。

作物作为整体，根和冠是对其最基本的划分，根、冠关系不仅与作物和环境间物质及能量交换有关，而且与作物本身许多过程相关，是一个涉及面积广，相当复杂的问题，可视为环境因素对其作用后，经过作物体内许多基本变化过程及自适应、自调节后最终所表现出的综合效应，是一个整体功能问题。研究根、冠关系，有利于指导用水分对作物实施合理调控，达到以最经济的资源代价（水分参量）换取根、冠间有利配合及高产的目的。

然而，这方面研究迄今不多[2]。根系研究的困难性也阻碍了人们对根、冠关系的认识，加之，田间试验不易于控制各种水平的水分条件，特别是极端水分条件。研究作物整体的结构、功能问题必然涉及调节、控制、竞争等机制，需要把局部存在的因果关系结合起来，解释作物整体的复杂行为。这不得不主要依赖于在各可观测变量间建立的严格数量关系。为此，本文利用作者已建立的根、冠系统模型，对土壤水与冬小麦根、冠功能均衡关系进行了模拟研究。

1　材料和方法

1.1　试验设计

本文所使用的数据是1992～1994年在中国农业大学科学园测得的，土壤类型为草甸褐土，土质为壤土，平均田间持水量为24.56%（质量含水量），容重为1.44g/cm³。所试小麦品种为北农2号，基本苗为450万株/hm²。共设置4个水分处理，每处理包括3个重复，共12个小区，小区面积为56.1（7×8.1）m²，随机布置。每次灌水量为0～60cm 土层田持的90%，采用地面管道输水，用水表控制。管栽试验是将大田表层土壤装填于灰色 PVC 硬塑管内，管内径10cm，长100cm，为防止根系盘结，底部装有约5cm 厚砂土。品种与大田一致，按大田播种密度折算，每管定株4棵。按占田持百分数共设置7个水分处理，试验期间利用感量1.0g 德产 PE-24型电子台称，采用称重法，并设防雨棚严格控制各处理水量恒定。除称重外，其余时间均置于地下，管口与地表齐平。

1.2　测定方法

播种定期（起身后几乎每周）取样测定，大田每次在各重复随机取10株苗测定地上部干物重，并同期用土、根钻每间隔10cm 取土分层测定1m 土体含水量及根量，将用内径为7.6cm 根钻采集的土样，置于容器中，浸泡10～12h 后，冲洗泥土并用0.15mm 筛过滤，将干净根、冠样分放在称量瓶内，在105℃下杀青0.5～2h，然后置于75℃恒温下1～2d 后，取出放入干燥器冷却，用万分之一电子天平称重。管栽各处理在每生育期至少取3管重复测定根、冠干物重，方法同上。

2　模拟方法

根、冠之间的关系表现为一个互利互制互反馈及自适应自调节动态功能平衡闭环系统，该系统可用如下二阶常微分非线性方程描述：

$$\begin{cases} \dot{R}_w(t)=a_{11}(t)\cdot R_w^2(t)+a_{12}(t)\cdot R_w(t)+a_{13}(t)\cdot S_w^2(t)+a_{14}(t)\cdot S_w(t)+a_{15}(t)\cdot W8t)+a_{1t} & (1) \\ \dot{S}_w(t)=a_{21}(t)\cdot S_w^2(t)+a_{22}(t)\cdot S_w(t)+a_{23}(t)\cdot R_w^2(t)+a_{24}(t)\cdot R_w(t)+a_{25}(t)\cdot W(t)+a_{26} & (2) \end{cases}$$

$a_{ij}(t)(i=1,2;j=1,2,\cdots,6)$是未知时变参数。式中 R_w、S_w 为根重和冠重，W 代表根层内土壤有效贮水量，本文根层深度定为1m，为统一单位，R_w、S_w 及 W 单位均定为 kg/m²。$\dot{R}_w$、$\dot{S}_w$ 代表根、冠干物质累积速率。模型允许随意划定计划层深度，W 了可用总贮水量表示。

此模型（1）、（2）式是根据作物根、冠关系及其受土壤水分影响的机制构建的，由能控性判据对模型结构辩识表明，该模型在系统边界条件的划定、状态变量的设置、变量间函数的关系的概化及模型整体结构的确定，均能保证本模型以可接受的精度再现根冠关系这一真实系统，具有较强普适性，适用于大部地区和各类作物。利用1992～1994年3套试验数据的大量验证结果表明，该模型预测精度较高，建模合理可靠，

维普资讯 http://www.cqvip.com

完全可以用其进行模拟试验获取认识[1]。

2.1 土壤水分恒定条件下根、冠关系模拟方法

根、冠之间相对消长关系常用根、冠重量比加以表征和研究。为消除时间因素干扰，在特定的生长阶段和恒定水分条件下，研究根、冠之间的消长关系，特将(1)、(2)两式等号两边相除，得下式：

$$dR_w/dS_w = F(R_w, S_w, W, t)/G(R_w, S_w, W, t) \tag{3}$$

这种方法有利于揭露根系与叶冠间相互影响的基本方面。

2.2 土壤水分变动条件下根、冠关系模拟方法

为设计控制变量(W)，利用此模型进行模拟试验，下面运用极点配置方法确定控制量，这是一种系统控制方法，可保证模型性能可靠稳定，在求解过程中、不会出现不稳定或发散现象。可任意配置极点的充要条件是系统完全能控，故用能控性判据作如下判别。

将(1)、(2)式模型中未建模动态(即常数项a_{15},a_{25})略去，先不考虑二次项，则可变为形如$\dot{x}=A\cdot x+b\mu$系统，见下式：

$$\begin{bmatrix}\dot{R}_w\\ \dot{S}_w\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{12} & a_{14}\\ a_{24} & a_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}R_w\\ S_w\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}a_{15}\\ a_{25}\end{bmatrix}\cdot W \tag{4}$$

系统完全能控的充分必要条件是b,Ab线性无关，即$det[b, Ab]\neq 0$

对本系统而言：

$$A=\begin{bmatrix}a_{12} & a_{14}\\ a_{24} & a_{22}\end{bmatrix}, b=\begin{bmatrix}a_{15}\\ a_{25}\end{bmatrix}, det=\begin{bmatrix}a_{15} & a_{12}\cdot a_{15}+a_{14}\cdot a_{25}\\ a_{25} & a_{24}\cdot a_{15}+a_{22}\cdot a_{25}\end{bmatrix}$$

用1992～1993及1993～1994年资料求得的行列式det值分别为$1.7468e^{-2}$、$1.4435e^{-4}$，均不为0，表明对应于该系统的线性系统(4)是完全能控的。因此，本系统完全可以任意配置极点。

现设计$W=-[k_1 \quad k_2]\cdot\begin{bmatrix}R_w\\ S_w\end{bmatrix}$对该系统实施调控，将$w$代入(4)式得：

$$\begin{bmatrix}\dot{R}_w\\ \dot{S}_w\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{12}-a_{15}\cdot k_1 & a_{14}-a_{15}\cdot k_2\\ a_{24}-a_{25}\cdot k_1 & a_{22}-a_{25}\cdot k_2\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}R_w\\ S_w\end{bmatrix} \tag{5}$$

希望为(5)式闭环系统配置极点，(5)式的特征根(即极点)满足如下方程：

$$det\begin{bmatrix}\lambda-(a_{12}-a_{15}\cdot k_1) & -(a_{14}-a_{15}\cdot k_2)\\ -(a_{24}-a_{25}\cdot k_1) & \lambda-(a_{22}-a_{25}\cdot k_2)\end{bmatrix}=0 \tag{6}$$

此二次方程有解的条件是λ_1、λ_2一定要有负实部，上式有负实部的充要条件是λ_1、λ_2均应小于0，由(6)式进一步可得：

$$\begin{cases}a_{15}\cdot k_1+a_{25}\cdot k_2-a_{12}-a_{22}-\lambda_1-\lambda_2=0\\ (a_{14}\cdot a_{25}-a_{15}\cdot a_{22})\cdot k_1+(a_{15}\cdot a_{24}-a_{12}\cdot a_{25})\cdot k_2+a_{12}\cdot a_{22}-a_{14}\cdot a_{24}-\lambda_1\cdot\lambda_2=0\end{cases} \tag{7}$$

任取λ_1、λ_2负值，据(7)式线性方程组即可解得k_1、k_2，记为$\tilde{k}_1$、$\tilde{k}_2$以给定的(或测得的)初值(R_{w0},S_{w0})求解下列微分方程：

$$\begin{cases}\dot{R}_w=(a_{12}-a_{15}\cdot\tilde{k}_1)\cdot R_w+(a_{14}-a_{15}\cdot\tilde{k}_2)\cdot S_w+a_{11}\cdot R_w^2+a_{13}\cdot S_w^2\\ \dot{S}_w=(a_{24}-a_{25}\cdot\tilde{k}_1)\cdot R_w+(a_{22}-a_{25}\cdot\tilde{k}_2)\cdot S_w+a_{23}\cdot R_w^2+a_{21}\cdot S_w^2\end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases}R_w(0)=R_{w0}\\ S_w(0)=S_{w0}\end{cases} \tag{9}$$

微分方程(8)与初值(9)的解记为$R_w=R_{w1}(t)$,$S_w=S_{w1}(t)$，设计灌水量$W_1(t)$：

$$W_1(t)=-[\tilde{k}_1\cdot R_{w1}(t)+\tilde{k}_2\cdot S_{w1}(t)] \tag{10}$$

至此，解出$W_1(t)$、$R_{w1}(t)$和$S_{w1}(t)$值即可随意作图，分析不同水量与时间配比情况下根、冠关系。

凡是系统输出对控制作用能有直接影响的系统，即为闭环系统，又称反馈控制系统。由(1)、(2)两式可

1) 冯广龙，土壤分水对根冠系统影响的试验与模拟研究，北京农业大学博士论文，1995。

维普资讯 http://www.cqvip.com

见，各式输出变量 $R_w(t)$ 和 $S_w(t)$ 同时又是另一式的输入变量。(10)式中的控制变量 $W_c(t)$ 直接依赖于(8)式中输出的 $R_w(t)$ 和 $S_w(t)$。因此，本模型是闭环系统并较好地体现了根、冠间互反馈特征。

3　模拟结果与讨论

3.1　土壤水分恒定条件下根、冠之间相互关系

根据第1种方法，本文重点考察了拔节、孕穗、抽穗、扬花这几个主要生育阶段不同土壤贮水量影响下根、冠消长关系。具体作法是，利用1993～1994年麦田试验数据，将算得的每个生育阶段内逐日时变参数平均值作为各生育阶段模型参数，将各生育阶段起始点所有处理 R_w、S_w 平均值作初值，设置不同恒定1m土体总贮水量，求解(3)式，并将求算所得的 R_w、S_w 作图，分析根、冠之间相互关系。

3.1.1　拔节期根、冠之间相互关系

图1显示出，在拔节期，无论1m土体贮水量如何(非极端情况)，根、冠之间均呈正比关系，即株体愈旺，根系发育愈庞大，这与表1所示每个恒定水量处理试验结果基本一致。当冠重恒定时，水量愈大，根系发育愈大，反映了在该生育阶段，根、冠间的相互作用对水分环境响应的内禀关系。虽很难用试验验证，但不难理解，一般叶冠总光合量是随水量加大而增大的，这种情况光合产物除冠层呼吸等损耗外，全部分配到了根系。而这种相互促进的关系，在不同水量条件下，其程度不同，由图可见，1m土体总贮水量在160～320mm水量之间，这种关系表现为随水量减少而均匀减弱。但是，这种促进作用是有条件的，当土壤水量低于150mm时，这种促进作用明显降低。这种降低，不是渐变过程，而是有阈值的。对本文使用的试验资料，这个水分阈值即为150mm，约相当于田间持水量的40%。

3.1.2　拔节后根、冠之间相互关系

从孕穗期开始，如水量不足，叶冠对根系生长即产生抑制作用(图2～图4)。阈值仍出现在150mm，在150mm以下，叶冠抑制根系生长。如1m土体水量超过150mm，叶冠则促进根系生长，株体发育愈大，其对根系促进作用随水量增大愈明显。冠重在1kg/m²之内，冠层随水量增加，对根系促进作用差异不大。

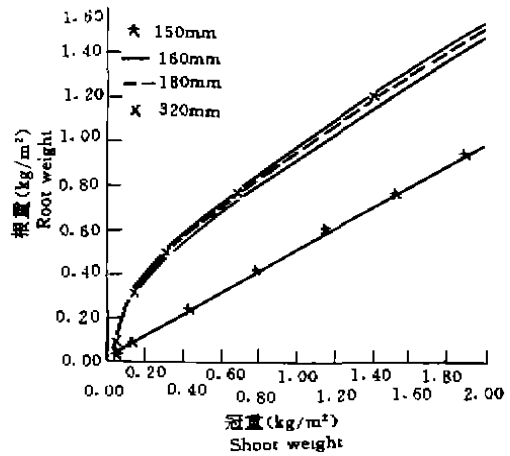

图1　冬小麦拔节期根、冠关系模拟结果

Fig. 1　The simulation results of relationships between root and shoot in jointing stage

1. 150mm，2. 160mm，3. 180mm，4. 320mm

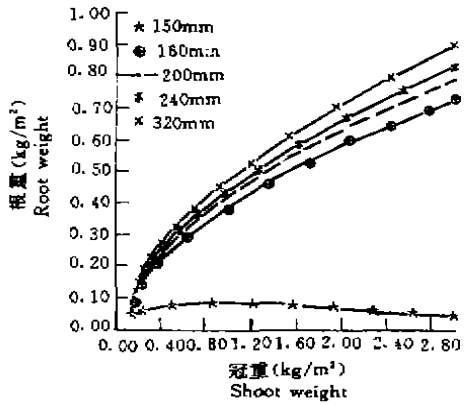

图2　冬小麦孕穗期根、冠关系模拟结果

Fig. 2　The simulation results of relationships between root and shoot in booting stage

1. 150mm，2. 160mm，3. 200mm，4. 240mm，5. 320mm

本试验所得出的阈值，其实践意义在于：为避免根、冠生长之间出现互抑互制现象，在节水灌溉中至少应使土体水量保持在此阈值之上，一些研究者也曾指出这过一极限指标[3,4]。

土壤水分恒定的条件，为作物对某一种水分环境的响应提供了表现的机会。就单一水分条件而言，根、冠成比例关系增长；就不同水分条件的比较而言，高水分条件对作物生长的促进，又反过来要求并可能较强地促进根系生长；在水量降低到突变阈值的情况下，根、冠也调整到按比例关系增长。这些不同方面展示

维普资讯 http://www.cqvip.com

了一致的根、冠关系；根、冠结构改变的方向，是维护两者之间的功能均衡。

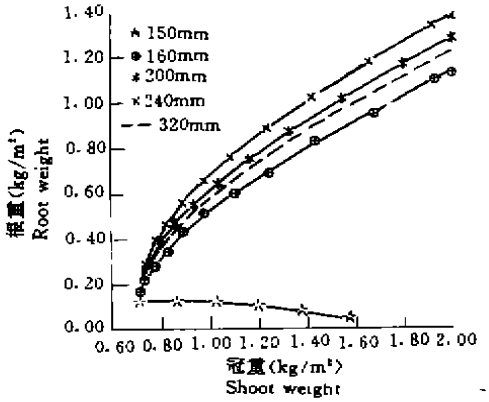

图3 冬小麦抽穗期根、冠关系模拟结果

Fig. 3 The simulation results of relationships between root and shoot in heading stage

1. 150mm, 2. 160mm, 3. 200mm, 4. 240mm, 5. 320mm

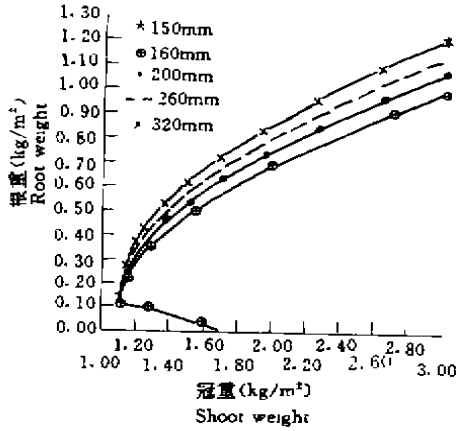

图4 冬小麦扬花期根、冠关系模拟结果

Fig. 4 The simulation results of relationships between root and shoot in flowering stage

1. 150mm, 2. 160mm, 3. 200mm, 4. 260mm, 5. 320mm

表1 1993～1994年管栽不同恒定水分条件下冬小麦根、冠关系试验结果(g/株)

Table 1 Experimental results of relationships between root and shoot of winter wheat under constant soil water in pot in 1993～1994(g/ind.)

处理 Treatment (field capacity%)	拔节期 Jointing stage			孕穗期 Booting stage			扬花期 Flowering stage		
	R_w	S_w	R/S	R_w	S_w	R/S	R_w	S_w	R/S
100～90	0.1790	0.5616	0.3188	0.3105	2.0045	0.1549	0.4353	0.4353	2.8879
90～80	0.1444	0.3179	0.4542	0.3919	2.1189	0.1850	0.3841	2.5101	0.1530
70～60	0.1140	0.2704	0.4246	0.2113	0.9467	0.2232	0.2878	1.7913	0.1607
50～40	0.0581	0.1126	0.5160	0.1380	0.5902	0.2339	0.1161	0.6366	0.1824

异速生长关系因其简便，以往在研究根、冠关系时被广泛采用[6]，但一直未见关于这种关系适用条件、范围的报道。由以上分析可见，异速生长模型产生是有其一定实验依据的，在一定水分范围内是正确的。然而，本研究显示，当1m 土体贮水量低于150mm 时，则不再遵循这一关系。

3.2 土壤水分变动条件下根、冠之间的相互关系

按第2种方法设置土壤水分动态 $W(t)$，并分别据各水量动态线模拟所得的根冠比(R/S)变化过程列入图中，重点考察拔节-成熟阶段内不同1m 土体有效贮水量对根、冠关系的影响，图中 DAP 代表播种后累积天数。

两年麦田各水分处理拔节期(180DAP)根、冠重平均值如下，1993～1994：$R_{w0}=0.032175kg/m^2$，$S_{w0}=0.05348kg/m^2$；1992～1993：$R_{w0}=0.07536kg/m^2$，$S_{w0}=0.07134kg/m^2$，以此作初值，进行模拟试验。

从图5及图6中可明显看出，水量变化过程线愈高，其 R/S 变化线则愈低，呈相反趋势。水量愈小，R/S (即 R_w/S_w，下同)愈大，这与文献报道的许多试验结果一致[6]，即干旱促进根系生长，使 R/S 增大，表1及图8试验结果也反映出这一规律。水分对 R/S 影响主要取决于拔节期，之后，水分变化对 R/S 影响不大。如在拔节、孕穗期(180～200DAP)，图5中水量大小顺序为 $W2>W3>W4>W5$，图6中 R/S 大小顺序则与此相反，为 $W5>W4>W3>W2$，200DAP 之后，虽水量顺序变为：$W5>W4>W3>W2$，但 R/S 仍维持以前顺

维普资讯 http://www.cqvip.com

序，随生育进程降低，未重新调整、变动顺序，试验数据显示出与此类似结论（图7、图8）。说明这段时间内，水量变化可明显影响根、冠之间相对生产比例、显著改变 R/S 大小、此期 R/S 对水分极为敏感。孕穗期（200DAP）之后，R/S 对水分已不大敏感。因此，在实践中欲用水分调控根、冠关系，最好能在拔节期进行，以往试验亦得出类似结论[7]。就某一水量变化过程线而言，尽管高低不同，变动情况各异，由于受其自身遗传因素制约，R/S 总体变化都随生育进程逐渐降低。但水分可影响 R/S 降低幅度。无论何时，水量差距多大，临近成熟时，R/S 均趋势于一致（约在0.1左右）。大量模拟试验与试验结果均得出以上结论。

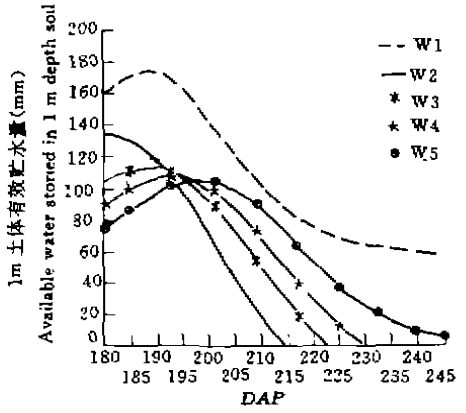

图5　所设置的1m土体有效贮水量（W）动态变化过程线

Fig. 5　The given dynamic of available water storied in 1m depth soil

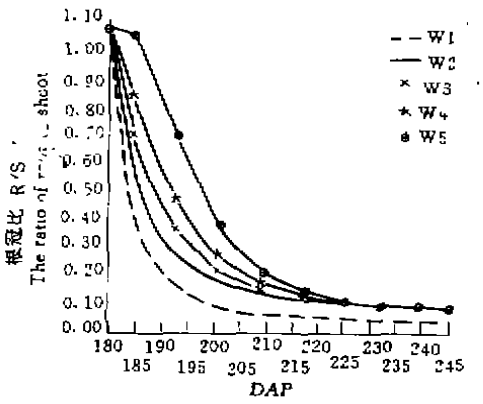

图6　据图5水量模拟所得 R/S 动态（1993～1994年）

Fig. 6　Simulation results of R/S with data in Fig. 5 (1993～1994)

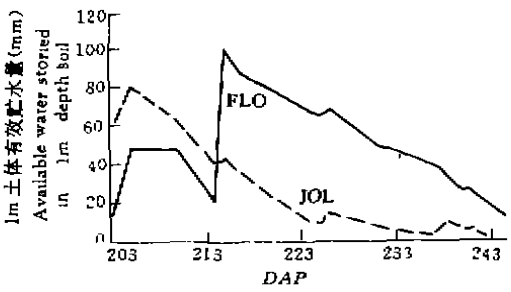

图7　1993～1994年麦田1m土体有效贮水量（W）动态

Fig. 7　The dynamic of available water storied in 1m depth soil (1993～1994)

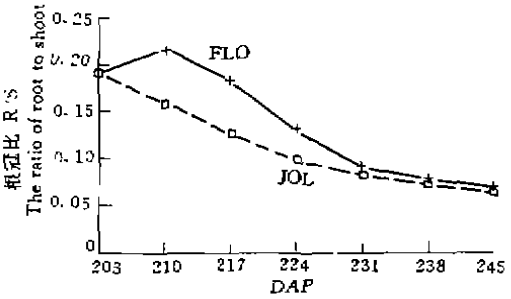

图8　1993～1994年麦田 R/S 动态变化过程

Fig. 8　The R/S dynamic of winter wheat in the experiment area of Beijing agricultural university (1993～1994)

初值冠重不变，根重缩小或扩大1倍，模拟结果与上述结论一致；初值根重不变，将冠重缩小或扩大，模拟结果趋势仍维持不变，但当将冠重扩大10倍时：$R_{n0}=0.03217kg/m^2$，$S_{n0}=0.4348kg/m^2$，即小根大冠，则得出与以前相反的结论。在这种根系数量过小的情况下，作物为维持根、冠间平衡，即使土体水量增加，也仍显著促进根系生长，即水量越大，R/S 越大。如图9中水量 $W4>W2>W1>W5>W3$，图10中相应 R/S 变化过程线大小排列顺序与此完全相同。就某一水量变动过程线而言，其相应 R/S 随生育进程虽仍呈渐降趋势，但降低幅度与其它用非过小根系为初值模拟的结果相比，大为减小。说明无论水量大小如何，这时根系对水分环境的响应也须服从对严重受抑根系的补偿生长。这种情况与去根试验观察到的根系补偿生长相一致[7]。对于初值所设定的严重失调的根冠比例，在生长发育的全过程中没有得到恢复，至成熟时，R/S 未

维普资讯 http://www.cqvip.com

能趋势于一致。

上述结果表明，无论是根系对水分环境的形态响应，还是受抑根系的补偿生长，都是为了调整根、冠的比例，以利于作物的生长、发育、结实。这种现象提示，作物总是趋向于在器官间维持一个合理的结构以实现根、冠间的功能均衡，是作物的一种基本行为。

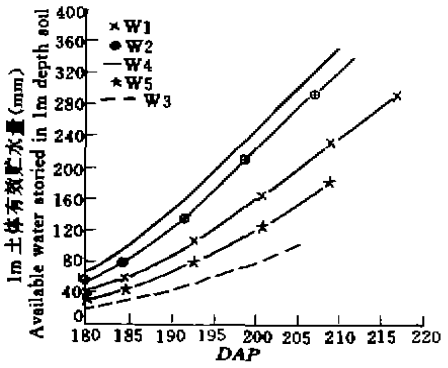

图9 所设置的1m 土体有效贮水量(W)变化过程线

Fig. 9 The given dynamic of available water storied in 1m depth soil

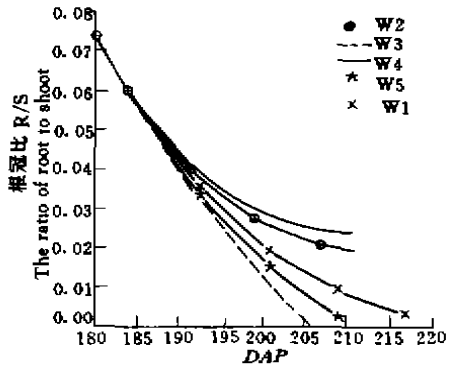

图10 据图5中水量模拟所得 R/S 动态(1993～1994年)

Fig. 10 Simulation results of R/S with data in Fig. 9 (1993～1994)

4 结 论

(1) 模拟研究揭示了土壤水分与冬小麦根、冠的结构、功能等关系，表明对难以观察直接因果关系的作物整体的复杂行为的研究，模拟方法是一种有效的途径。

(2) 在水分恒定条件下，拔节期无论1m 土体总贮水量大小(非极端情况)，根、冠间均呈正比关系。冠层对根系的促进程度在水量150mm(约相当于田间持水量的40%)时发生分异，水量在此之上，根系被促进程度远大于150mm 以下水量。自孕穗期起，如1m 土体总贮水量在150mm 以下(包括150mm)，冠层对根系起抑制作用，即冠越大，根越小，不再遵循异速生长关系。在150mm 以上，冠层越大，根系相应也越大。此阈值应作为麦田土壤水分管理的下限。

(3) 根、冠重或根、冠相对比例的初值在正常范围内，模拟水量大小与其相应 R/S 排列顺序相反，水量越小，R/S 越大。干旱抑制冠层生长，促进根系发育，根系绝对生长量有时可达到水分条件较好水平。由于受遗传因素制约，至成熟时 R/S 均趋于一致，约为0.1左右；若初值冠特别大，根系相对很小，则呈相反趋势。由于根、冠相对比例严重失调，为恢复平衡，无论水量大小，对根系生长均起促进作用，水量越大，R/S 越大，且临近成熟时，R/S 并未达成一致。

(4) R/S 在拔节期受水分影响最大，R/S 随水量大小顺序波动主要取决于拔节期，后期水分变化对 R/S 影响很小，R/S 对水分的敏感度大为降低。因此，由水分调控根、冠关系时，在拔节期为宜。

(5) 作物根系与叶冠对其水分环境作出响应时，资源收集器官与资源利用器官间的结果调整以维持相互间的功能均衡，是作物在整体水平上表现出的一种基本行为。

(6) 本试验所利用的模型是经过充分验证的，具有较强普适性和较高模拟预测精度。模拟对象是冬小麦根、冠互利互制系统及其对土水环境响应特征，而且是在整体水平上研究的，属理论性探索。因此，反应的是在不同水分条件下冬小麦根、冠关系的普遍性规律，对其它地区冬小麦乃至大部分作物同样适用。查清了根、冠间互利互制消长反馈关系及其所需土水条件，便可在作物生长过程中进行合理人为干预，实施目标明确的调控。因此，本文为在农业生产中进行作物调控，实现资源高效利用，提供了一个逻辑框架和切实可行的通用定量模拟调控方法与工具。

维普资讯 http://www.cqvip.com

参 考 文 献

1 Tenhunen JD(eds). *Plant response to stress*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1987, 200

2 Geijn SC, Vos J, Groenwold J. The Wageningen Rhizolab—a facility to stud y soil-root-shoot-atmosphere interaction in crops. *Plant and Soil*, 1994, **161**: 275

3 马元喜, 王晨阳, 周继泽. 小麦根系主要生态效应的研究. 河南农业大学学报, 1994, **23**(1): 12～18

4 王晨阳, 马元喜. 不同土壤水分条件下小麦生态生理效应的研究. 华北农学报, 1992, **7**(4): 1～8

5 Hunt RE, Nobel PS. Allometric root/shoot relationships and predicted water uptake for desert succulents. *Ann of Bot*, 1987, **59**: 571

6 Brouwer R. Functional equilibrium: sense or nonsense. *Neth J Agric Sci*, 1983, **31**: 335

7 刘殿英, 黄炳茹, 董庆裕. 土壤水分对冬小麦根系的影响. 山东农业大学学报, 1991, **22**(2): 259～364

8 Biddington NL, Dearman AS. Shoot and root growth of lettuce seedings following root pruning. *Ann of Bot*, 1984, **53**: 663