

生物节水中的补偿效应与根系调控研究

袁永慧, 邓西平, 黄明丽, 白登忠

(中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点试验室 西北农林科技大学 陕西杨凌 712100)

摘要: 本文分别介绍了作物对干旱、复水的响应, 及水通道蛋白、信号传导在水分调控中的最近研究进展, 并从根系方面分析了补偿效应与根系对水分的吸收和运输的关系。干旱对植物的影响一般存在临界期, 而植物旱后复水有其自身的补偿有效期, 选择在关键期供水往往会取得最好的灌水效果。因此, 旱地作物生产中可以通过调节灌溉次数和灌溉量、利用作物自身潜力达到节水目的。

关键词: 干旱复水; 水分传输; 水通道蛋白; 信号传导; 补偿效应; 生物节水

中图分类号: S311 文献标识码: A

文章编号: 1008-0864(2003)06-0024-05

在我国, 水分因子已经成为限制农业生产的主导因子。水资源日益短缺、地域时空的分配不均, 但同时农业用水有效性极差、浪费严重, 因而在水的利用上具有很大的潜力空间。

作物都有其自身的需水规律, 在不同的发育期对水的需求不同, 干旱造成的影响程度也不同。有限水分亏缺下作物能够在营养生长、物质运输和产量形成等方面形成有效的补偿机制, 利用和开发植株自身的生理和基因潜力, 能够达到对水分的高效利用。山仑院士等通过对我国干旱地区农业发展现状分析, 提出可持续发展战略应以实现资源的高效利用, 提高作物生产力为目的, 并提出了推广生物节水的方针^[1]。生物节水, 即通过遗传改良和生理调控的途径来提高植物水分利用效率和抗旱性, 也就是挖掘作物自身的高效用水潜力。本文基于干旱复水条件下作物的补偿效应, 在吸水—运输—补偿三者的关系上对生物节水中的补偿效应与根系调控进行了综述。

1 作物对水分亏缺及复水的响应

1.1 作物对水分亏缺的反应

农田有其独特的生态系统, 水分状况经常处于一种干湿变化之中, 作物与水分的关系在长期协调中达成内外系统的动态平衡。不同作物、品种、不同生育期

对干旱的敏感性是不同的, 耐旱极限也有所差异, 特别是营养生长与生殖生长的不同主导中, 干旱往往造成不同的影响。

作物在干旱的环境中既有抗也有耐, May 和 Miltorpe^[2]曾根据适应机制的不同将植物对干旱的适应方式分为避旱、御旱和耐旱。其中既有形态方面的适应, 也有生理生化上的适应——ABA 对气孔开关的调节、水通道蛋白对水分的调控、渗透调节等。最重要的是植物对干旱一系列的主动性响应, 如增加细胞溶质、降低渗透势、维持膨压及细胞扩张、气孔启闭等生理响应过程, 来增强作物对干旱的抵抗能力。这些变化并不是单独发生的, 而是相互联系, 一种变化的发生往往会启动另外一种或几种机制的响应, 具有一定的协同性和整体性。

植物在干旱逆境下有一定范围的适应性, 可发生细胞水平的生理反应、基因表达水平的变化和 DNA 水平的变异。在这种环境胁迫下, 环境信息都会或多或少地记录到生物上, 使其获得抗逆反应和抗逆性, 从而适应不同的环境, 这就使得作物的抗旱性又有一定的遗传基础。

郭贤仕在谷子旱后补偿的研究中表明, 前期干旱锻炼可以使水分利用效率大幅度的提高^[3], 我国北方农民早有“蹲苗”经验, 南方水稻也有“晒田”的过程。水分亏缺会引起植物宏观、微观、分子各个层次上的相应改变, 宏观上主要是分蘖能力、株高、株形等群体和植株水平; 微观指原生质、细胞器、质膜特性的变化等; 分子上包括激素代谢改变、光合作用变化、渗透物质的积累等。近年研究中的一个重要进展是水分胁迫下信使和信号传递。信号传导主要研究植物如何通过细胞感受逆境信息、传导逆境刺激、激活一系列分子途径并调控相关基因表达和生理反应以适应逆境, 并在逆境中获得抗逆性^[4]。水分关系影响到信号的产生、运转, 但根系对胁迫的感知、传递和作物响应机制、细胞的信号传导, 作物激素在信号传导及调节中的机理都有待于进一步揭示。

收稿日期: 2003-04-27

作者简介: 袁永慧, 女, 1978 年生, 在读硕士; 专业为作物抗旱生理。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011708)。

© Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

植物对干旱生理的响应可能存在一个适应、伤害、修复、补偿的自我调节过程,与胁迫的强度和持续时间有关。植物对水分胁迫的响应是基因型和胁迫状况共同作用的结果^[5]。植物的生长发育受遗传信息及环境信息的调节调控,遗传基因规定个体发育的潜在模式,其实现很大程度上受控于环境信息^[4]。在旱地生产中,可以利用环境因子的控制作用及可变性,人为地改变或创造有利产量形成的小环境,从而提高作物的水分利用效率(WUE),将节水和高产统一起来。

1.2 作物对复水的响应

1.2.1 干旱的滞后效应(lag effect)

植物体内存在一种潜在的恢复能力,一种类似于惯性的调节作用,在外部环境改变后,植物具有保持原生长状况的趋势。作物对缺水的抗逆过程是一个受环境影响的连续系统,某阶段缺水不仅影响本生育阶段,还会对其后生长发育阶段和干物质积累产生“后遗性”影响,称滞后效应(T. C. Hsiao)^[6]。在水分胁迫终止后,胁迫对作物所造成的某些效应可以持续一段时间,即存在一种“记忆”^[7]。作物对灌水后效果的反应也是一种延时滞后反应,即灌水后要隔一定时间水分供应才能对生理和生殖生长产生明显影响^[6]。Gallacher 也指出,生长对水分变动的反应是一种滞后效应,复水后植物体生长滞后表现是其生理机能的修复过程^[8]。

水分亏缺对与产量密切相关的生理过程的顺序为:生长-蒸腾-光合-运输。如有限缺水虽然会影响叶片生长,但不一定影响叶片气孔的开放,因此不会对光合速率产生明显影响;水分亏缺条件下作物蒸腾量虽明显减少,但对蒸腾影响的程度小于对细胞扩张和生长影响程度。虽然水分亏缺对蒸腾的影响迟缓于生长,但在水分亏缺过程中蒸腾作用却比光合作用先下降,即使在中度水分亏缺条件下气孔开度减小、蒸腾速率大幅度下降,而光合速率下降仍不显著,不致显著影响作物体内有机物质的积累,最终不一定造成减产。同时,水分胁迫对叶面积的滞后影响大于对冠层生长的滞后影响,对冠层生长的滞后影响又大于对根系生长的滞后影响,表明对水分胁迫越敏感的作物生长过程,水分胁迫对它的影响也越大,生长早期的水分胁迫对作物生长的滞后影响相对较小^[9]。

滞后因指标选择、环境、物种而异,与胁迫时间、强度等都有关系。水分变动与作物作出反应之间有间隔,不同的生理反应过程有先后,反应的程度也有所不同,但不同的过程相互影响牵制,在作物上却是反应了一种综合效果。

1.2.2 复水的激发效应(stimulating effect)

激发

效应是指由于某种资源少量补充而引起作物对系统中资源利用总量增加,产量和资源利用效率大幅度提高的现象^[10]。在农业方面,激发效应首先是由 Bingham 等人(1953)在关于新鲜有机物对土壤有机质分解效应的论文中提出的,后来被用于描述土壤氮素与肥料氮素之间的关系。在干旱复水的环境下,有限的供水保证了作物生存,另外也增强了作物对养分和水分的吸收能力。在一定的环境条件下,输入与输出是相对稳定的,系统处于相对的平衡状态。然而为了获得更高的生产力,就必须向系统增加投入,使系统的平衡上升到一个更高的层次。如果投入的因子是当前的限制因子,特别是极度匮乏、生死攸关的生活要素,则往往使得作物利用资源的能力大大增强,从而使生产力和资源利用效率得到大幅度提高,表现为激发效应。在“木桶原理”中最短的木片为决定因素,干旱情况下水分为关键因子,量的变化会引起质的飞跃,外在表现即激发效应。

作物在克服生产中限制因子的过程中往往产生激发效应,导致产量、资源利用效率和经济效益的大幅度提高。在生态上, Acevedo. E 指出,高等植物对水分胁迫—复水的响应方式是在胁迫解除后存在短暂的快速增长,以部分补偿胁迫造成的损失^[11]。生长前期受到适度干旱的作物,灌水后其光合速率可高于一直处于供水充分的作物。作物旱后的激发生长应该是作物受到适应范围内(阈值)的水分胁迫压力后,在具有恢复因子和复水过程条件下所表现的生产力方面显著提高的超常效应^[12]。

大量研究表明,轻度干旱虽然对作物生长有抑制作用,但同时也加快了发育进程和籽粒灌浆速度^[8],所以干旱并不总是降低产量,一定生育阶段控水干湿交替对产量更为有利。中度缺水促进了小麦灌浆进程^[13],使初期灌浆速率加快,只有持续干旱才对物质运输起抑制作用。这种有限缺水效应将引起同化物从营养器官向生殖器官分配的增加,其结果可能有利于经济产量的形成或不明显减产。因此,可以创造干旱后复水激发效应产生的条件,人为诱导激发效应发生,增加产量,提高水分利用效率,从而达到节水的目的。

1.2.3 干旱——复水的补偿效应(compensatory effect)

(表1) 植物对干旱逆境胁迫引起的损失具有弥补作用,在生理生态等功能得到一定程度的恢复,表现出一定的补偿效应,它是作物抵御外界短暂干旱环境的一种体内调节机制。

植物本身在生殖、发育等方面具有多种可能性,也就是植物的可塑性。在环境的锻炼下有朝生长最有

利的方向发展的潜在趋势。作物在某一生育阶段受旱复水之后,增加了作物本身的渗透调节能力,渗透物质的积累调节又维持了一定的膨压,加强了作物对不利环境的适应性,并且能够在光合、生长、物质运输等生理过程产生有效的补偿机制,从而实现有限水分的高效利用。

补偿效应外部表现为生长、光合的恢复,内部主

要是酶活性的提高、渗透调节、ABA 作用等。补偿的形式和内容也呈现多样性,研究较多的是生理过程、代谢功能的补偿,即一定程度上作物某种生理功能的减弱,则伴随其他生理功能的加强^[14]。作物受旱后复水植株的补偿生长贯彻于整个生育期^[15,16,17],补偿的程度因水分亏缺发生的时间、亏缺强度、持续时间、相关阶段的关联和敏感性而异。

表 1 小麦不同生育期复水处理与对照的产量、耗水量及水分利用效率

Table 1 The seed yield, water consumption and water use efficiency of the treatments and controls

处 理 treatments	产量 yield (kg/hm ²)	生物量 biological yield (kg/hm ²)	收获指数 harvest index (%)	耗水量 water consumption (mm)	水分利用效率 water use efficiency (kg/hm ²)
分蘖期复水 rewatering in tillering stage	5 342.27	16 421.82	32.53	453.47	11.8
拔节期复水 rewatering in jointing stage	6 086.30	26 287.31	23.15	585.56	10.4
开花期复水 rewatering in anthesis stage	5 520.28	17 985.90	30.69	430.55	12.8
充分供水 80% well-watered	6 520.33	25 223.26	25.85	631.51	10.3
水分胁迫 60% water stress	4 841.24	12 715.64	38.07	385.69	12.6

陈晓远、罗远培在冬小麦不同生育期复水的补偿效应研究中^[18]得出:前期干旱后再在不同时期复水的产量都超过干旱对照,但节水效果高于充分供水;拔节期复水增产效应最大,开花期复水节水效果最好;从收获指数看,复水处理均小于干旱对照,说明水分胁迫有利于光合产物向籽粒调运,复水对营养生长比生殖生长的促进作用更为明显。显然,由于有补偿机制的作用,小麦在整个生育期并没有必要保持充分水分条件。在生产中,利用作物的补偿效应,在一定的生育期干旱、一定的时期供水,在适合的时期减少灌水次数和灌水量,这样在总体上减少了灌水量,而作物在一种干湿交替的环境中取得相对较高的产量。

梁宗锁在小麦干旱复水时气孔导度、水分耗散率对叶水势间联系的研究中表明^[19]:干旱复水变动有着明显的补偿效应——减少蒸腾,加快生长,提高水分利用效率。康绍忠在黄土高原冬小麦有限灌溉对产量和 WUE 的影响研究中也指出^[20]:不同时期进行控水,蒸腾、生物量、WUE 与收获指数都会明显的变动,高水情况下植物会有高蒸腾,但产量并不是最高,WUE 也较低;而有限灌溉和适度水分亏缺往往带来高的 WUE 和收获指数,和充分供水相比,有限灌溉有其自身优势——花期前较少的地上生物量、灌浆期较高的净光合速率及最后的高产量。

胁迫环境中作物滞后效应,复水后补偿效应和不同作物、品种、不同发育阶段对胁迫的不同反应与产量形成过程的关系,始终是抗旱生理研究热点。

2 水分亏缺下根系的响应及补偿

根是吸收水分的主要器官,干旱会引起根系的生长、形态、生理生化等变化反应,根的研究也是抗旱生理学基础的一个重要方面。植物的水分平衡是通过根系吸水和冠层蒸腾失水之间的动态变化来维持的,不同特定组织与器官对植物体内水势降低的反应并不相同^[14]。干旱胁迫刺激根系的补偿功能,吸收能力加强,促进生长发育、新陈代谢,促进发芽生根,使其具有深而广的贮水性和调水网络,具有受旱后较强的水分补偿能力、分蘖补偿能力。

干旱最先影响的是生长过程。Sharme 等观察到,干旱能促进根系伸长,增加分枝次(级)数,使得深层根相对增加,从而更加充分的利用土壤水分^[21]; Logullo et al 也证明^[22],旱后复水促使根尖恢复生长并产生侧根和根毛;在根系空间分布上,根系明显下扎生长,下层根系生物量相对增多^[23],土壤水分亏缺导致次生根条数减少,影响根毛的发育,但在干旱土壤下根系生长会尽量朝增加与土壤的接触面积方向发展,有利于作物获得下层水分;Gajri 通过研究发现,土壤水分状况可以改变根系膨压而影响小麦根系生长,干旱胁迫抑制根系组织细胞的伸长,只有当平均膨压恢复到根系的平均生长速率时才能恢复^[24],其中可能与根冠细胞感知传递调控生长信息有关;另有研究表明,在小麦不同生育时期,干旱对根系的影

响是不同的, 有其阶段性反应, 其中以春季播种后水分亏缺的影响最大^[25], 严重时甚至不能形成次生根, 干旱对次生根的减少在拔节期幅度最大, 拔节以后对土壤水分减少的适应能力明显变弱^[26]。

通过对胁迫条件下根系结构的研究^[27], 得出干旱使其根系细胞排列紧密, 物质构成也发生了改变, 内外皮层木栓质、木质素含量增加, 从而提高了根系导水率, 干旱时的受损根系复水后虽然不能恢复原有的结构, 但可以通过补偿机制在分蘖节处产生新根, 恢复吸收功能。

在生理生化方面, 水分亏缺导致根系比表面积、根吸收速率降低, 冬小麦根系活性随胁迫的加强而下降, 拔节后根系对土壤水分减少的适应能力变弱。干旱胁迫下, 根系的膜系统有一定反应和调节, 使得膜透性增大, 而这些变化与根系保护酶的代谢有关。另外, 在呼吸方式和强度也有一定的反应。

因此补偿首先可能是根系方面, 显然根的形态、结构、分布都会发生相应变化与调整, 特别是根系的更新和活力增强^[28], 大量活性根的出现增加了作物对土壤深层水的吸收利用。在水分胁迫造成损伤之前, 根系就已经感知到土壤水分胁迫, 并将这种信号传递到地上部分, 使作物作出适应性的调节反应, 以使作物本身作出最优化的选择^[29]。这样水—土—植物的关系更加紧密协同起来。

3 干旱条件下根系对水分的调控与运输

在植株体内, 根系吸收的水分通过径向和轴向向地上部分运输。径向途径指水分由根表进入根木质部导管所经过的路径, 分为质外体途径和细胞到细胞途径; 轴向途径指水分在根木质部导管中向上运输的过程。

径向水分运输阻力主要是凯氏带, 幼根径向阻力平均分配在各组织中, 若内皮层和外皮层栓质化或木质化, 则集中于这两层^[30]。Stuedle 和 Peterson^[31]认为径向阻力是根吸收水分的主要阻力; 轴向阻力主要是导管中气泡形成的栓塞^[32], 干旱可能会诱导栓塞的形成^[33]。水分运输途径及其作用的大小会因物种、环境条件而异, 对具有成熟导管的植物, 轴向阻力可忽略不计^[30]; 渗透胁迫下, 根系吸水主要依靠细胞到细胞途径^[34]。植物根据自身对水分的不同需求, 调控不同水分传输途径和不同的水分传输阻力, 优化根系吸水, 保持体内的水分平衡。

在调控植株水分状况时, 水通道蛋白(aquaporin, AQP)发挥着重要的作用。水通道蛋白负责水分的

跨膜运转, 水分通过水通道蛋白出入细胞, 它近年才发现的一类运输水分的质膜或液泡膜上的内在蛋白。研究表明 AQP 参与渗透胁迫响应^[5]及维持水势的平衡^[35]; Clarkson^[36]等认为根导水率的变化与 AQP 丰度密切相关; Holbrook 和 Zwieniecki 认为 AQP 在修复导管栓塞中起重要作用。但目前对水通道蛋白与组织、器官和植株的水分关系还不了解, 对整株植物水分调控机理也不清楚。

在根系水分运输方面, 干旱直接会对根的导水率产生影响。蒸腾强度、ABA、渗透压、膨压等都会改变根的导水率, 而这些也是植物补偿调节的方面, 补偿与根系的调节是密切相连的。

4 结论

在适度干旱时, 作物通过根系水分吸收运输到叶面蒸腾等一系列生理生化调节, 来优化调控体内水分平衡。联系根系对水分的吸收与运输, 补偿效应的研究, 从水分亏缺角度、补偿角度以及经济学的角度提出一种合理的灌溉方式。作物灌溉中, 了解作物对干旱的敏感期、把握需水临界期和补偿高效期, 根据作物需水规律, 选择合适的生育期进行干旱锻炼, 在关键期供水, 合理分配灌溉水, 高效利用有限灌溉水, 使作物的用水分配更合理化科学化, 实行一种有限而高效的供水方式。

参 考 文 献

- [1] 王晨阳, 马元喜. 不同土壤水分条件下小麦根系生态生理效应的研究[J]. 华北农学报, 1992, 7(4): 1- 8
- [2] Liang Zongsuo, Zhang Fusuo and Zhang Jianhua. The relations of stomatal conductance, water consumption, growth rate to leaf water potential during soil drying and rewatering cycle of wheat [J]. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 2002, 43: 187 - 192
- [3] Holbrook N M, Zwieniecki M A. Embolism repair and xylem tension: Do we need a miracle? [J]. Plant Physiology, 1999, 120: 7- 10
- [4] 刘殿英, 石立岩等. 栽培措施对冬小麦根系及活力和植株性状的影响[J]. 中国农业科学, 1993, 26(5): 51- 56
- [5] 梁卫理, 王贵彦等. 作物生产系统中的激发效应[J]. 农业现代化研究, 1999, 20(4): 222- 225
- [6] 刘晓英, 罗远培等. 考虑水分胁迫滞后影响的作物生长模型[J]. 水利学报, 2002, 6: 32- 37
- [7] Shaozong Kang, Lu Zhang, Yinli Liang, Xiaotao Hu, Huanjie Cai, Binjie Gu. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China [J]. Agriculture Water Management, 2002, 55: 203- 216

- [8] Schaffner AR. Aquaporin function, structure and expression: Are there more surprise to surface in water relation[J]? *Planta*, 1998, 204: 131- 139
- [9] 山仑, 邓西平等. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J]. *水利学报*, 2002, 9: 27- 30
- [10] Melchior W, Steudle E. Water transport in onion roots. Changes of axial hydraulic conductivities during root development [J]. *Plant Physiology*, 1993, 101: 1305- 1315
- [11] Lo Cullio M A, Salloes S. Different vulnerabilities of *Quercus ilex* L. to freeze-and summer drought- induced xylem embolism: an ecological interpretation [J]. *Plant Cell Environment*, 1993, 16: 511- 519
- [12] 刘建利. 石元春等. 作物生长对土壤水分变动的双重效应[J]. *生态农业研究*, 1997, 3(5): 18- 21
- [13] Gallcher AE and Sprent JI. The effect of different water regimes on growth and nodule development of greenhouse grown *Vicia faba*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1978, 29 (109): 413- 423
- [14] 陈晓远, 罗远培等. 拔节期复水对苗期受旱冬小麦的激发效应[J]. *中国农业大学学报*, 1999, 4(3): 23- 28
- [15] Clarkson D T, Carvajal M, Henzler T, et al. Root hydraulic conductance: diurnal aquaporin expression and the effects of nutrient stress [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51: 61- 67
- [16] Levitt J. Response of plants to environmental stresses [A]. water, radiation, salt and other stresses [C]. New York: Academic Press, 1980: 325- 250
- [17] Acevedo E, Hsiao T C, Henderson D W. Immediate and subsequent growth response of maize leaves in water stress [J]. *Plant Physiology*, 1971, 48: 631- 636
- [18] 关义新, 戴俊英等. 玉米花期干旱及复水对植株补偿生长及产量的影响[J]. *作物学报*, 1997, 23(6): 740- 745
- [19] 陈亚新, 于健. 考虑缺水滞后效应的作物——水模型研究[J]. *水利学报*, 1998, 4: 70- 74
- [20] 王学臣, 任海云等. 干旱胁迫下植物根与地上部间的信息传递[J]. *植物生理学通讯*, 1992, 28(6): 397- 402
- [21] Schreiber L, Hartmann K, Skrabas M, et al. Apoplastic barriers in roots: chemical composition of endodermal and hypodermal cell walls [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50: 1267- 1280
- [22] Palta J A, Kibata T, Turner N C. et al. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by post- anthesis water deficits [J]. *Crop Sci*. 1994, 34: 118- 124
- [23] Sharme B R, Chaudhary T N, wheat root growth, gain yield and water uptake as influenced by water regime and depth of nitrogen placement in a sand [J]. *Agriculture water management*, 1983, 6: 365- 373
- [24] 黄占斌. 干湿变化与作物补偿效应规律研究[J]. *生态农业研究*, 2000, 3: 30- 33
- [25] 张军锋, 邓西平等. 植物的水通道蛋白[J]. *植物生理学通讯*. 2002, 38(2): 1- 4
- [26] Acevedo E, TC Hsiao, D W Henderson [J]. *Plant Physiol*, 1971, 48: 631- 636
- [27] 王空军, 郑洪建等. 我国玉米品种更替过程中根系时空分布特性的演变[J]. *植物生态学报*. 2001, 25(4): 472- 478
- [28] Gajri P R. Effects of nitrogen and early irrigation on root development and water use by wheat on two soils [J]. *Field Crops Research*, 1989, 21: 103- 114
- [29] Gullo, M. L, Nardini. A, Salleo S and Tyree M. Changes in root hydraulic conductances of Oleaster seedlings following drought stress and irrigation [J]. *New Phytol*, 1998, 140: 25 - 31
- [30] 郭贤仕. 谷子旱后的补偿效应研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 563- 566
- [31] 陈晓远, 罗远培. 开花期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究[J]. *作物学报*, 2001, 27(7) : 512- 516
- [32] 缪颖, 五炳华. 植物抗逆性的获得与信号传导[J]. *植物分子生理学通讯*: 2001, 37(2): 71- 76
- [33] Nettong AG . pH, Abscisic Acid and the integration of metabolic in plants under stressed and Non- stressed conditions: cellular response to stress and their implication for plant water relations [J]. *Exp. Bot*, 2000, 51(343): 147- 158
- [34] 杨晓光, 于沪宁. 冬小麦、夏玉米水分胁迫监测系统[J]. *生态农业研究*, 2000, 8(1): 27- 29
- [35] Steudle E, Peterson C A. How does water get through roots? [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49: 775- 788
- [36] 邓西平, 山仑. 旱地春小麦对有限灌水高效利用的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1995, 13(2): 42- 46

Studies on Compensatory Effect and Root Adjustment in Biological Water-saving Agriculture

YUAN Yong-hui, DENG Xi-ping, HUANG Ming-li, BAI Deng-zhong

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources;

Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest, Yangling Shanxi 712100, China)

Abstract: This paper mainly introduced crop's response to drought, re-watering, and the current development of aqua-protein and signal conduction in water transportation. It also analyzed the relation between root absorption, transportation, and compensatory effect. As a result, the effect of drought on plant had its own critical period, and re-watering after drought had efficient compensatory stage. It would gain best irrigating effect if water was supplied in critical stage. So by reducing the frequency and amount of irrigation, and taking use of crop's natural potential, the aim of saving water could be achieved in the droughty agriculture region.

Key words: drought-rewatering; water transportation; aquaporin; signal conduction; compensatory effect; biological water-saving technique