

## 农业水分利用率及其对环境和管理活动的响应

许振柱, 周广胜\*

(中国科学院 植物研究所 植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

**摘要:**全球变化引起全球温度升高,降水格局发生变化,使淡水资源更加匮乏。农业是占据首位的用水大户。如何节约农用水,提高农业水分利用率(WUE)是节约淡水资源,促进水资源的可持续利用,加快干旱和半干旱地区社会经济发展的关键。农业水分利用效率的概念及其表达式根据不同尺度、应用目的等而不同。提高 WUE 主要有两种原则:减少地表径流和蒸发,以及提高作物的蒸腾效率。论文描绘了提高农业水分利用率的模式图,提出了今后应着重研究的方向。

**关键词:**农业;水资源;全球变化;水分利用率;环境;管理活动

**中图分类号:**S157.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-3037(2003)03-0294-10

全球变化研究以全球变化与陆地生态系统相互作用的“水循环、碳循环、食物与纤维”为核心<sup>[1,2]</sup>。全球变化引起全球温度升高,降水格局发生变化<sup>[3,4]</sup>。据预测,全球 CO<sub>2</sub> 浓度倍增后气温将增高 4℃左右<sup>[3]</sup>,从而使降水格局发生变化,引起水资源增加或减少,变幅为±10%<sup>[5]</sup>。根据中国区域的气候模拟,在假定 CO<sub>2</sub> 浓度继续增加的背景下,中国西部的温度将比 2000 年增高 1.7℃~2.3℃,降水增加 5%~23%<sup>[6]</sup>。升温导致蒸发增加,即使在降水增加 20%的情况下也不可能改变中国西北干旱半干旱地区干旱缺水的状况<sup>[7]</sup>。

另一方面,世界人口的持续增加,使有限的水资源更显匮乏<sup>[5,8]</sup>。预计全球变化对作物的生产将产生负面影响,使粮食产量减少<sup>[3,9]</sup>。淡水资源不足对农业带来的压力将愈来愈大<sup>[10-12]</sup>。Shilomannov<sup>[13]</sup>估计有 75%的淡水资源用于农业的灌溉,在中国达在 77%以上<sup>[14]</sup>。一些研究者通过估算和预测指出,目前全球约有 70%的人口生活在缺水地带,而到 2050 年将有 1/6 的人对水的基本需求得不到满足,全球将有 67%的人口生活在水分供应短缺的地区<sup>[15]</sup>。本文阐明农业生态系统中水分利用率(WUE)的概念及其研究意义,并探讨提高水分利用效率的方式方法及重点研究方向。

## 1 农业水分利用率的概念及其研究意义

在农业生产活动中,作物消耗单位水量所产生的同化量对于合理利用和最大限度地节约水资源具有重要的理论和生产指导意义。水分利用率的概念就是基于此而提出的。

农业水分利用率的概念及其表达式有以下几种:

(1)叶片水平上的生理学概念 以单位蒸腾量固定的净 CO<sub>2</sub> 量,即植物的蒸腾效率来表示<sup>[16]</sup>:

$$WUE = PH/TR \quad (1)$$

式中,PH 为单叶的净光合速率;TR 为蒸腾速率。其单位是  $\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{mol}^{-1}(\text{H}_2\text{O})$ ,即消耗单

收稿日期:2002-10-17; 修订日期:2003-01-20。

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KSCX2-1-07)、国家重点基础研究发展规划项目(973 项目)(G1999043407)和国家自然科学基金重点项目(39730110)。

第一作者简介:许振柱(1965~),男,山东宁阳人,博士,主要从事全球变化与陆地生态系统和水分生理生态方面的研究工作。

\*通讯作者:E-mail:zhousg@public2.bta.net.cn

位摩尔水所吸收的  $\text{CO}_2$  的摩尔数。由于便携式光合测定系统的广泛应用,使这一测定计算方法简便易行,缺点是只能表示某一时刻的瞬时值,而测定的部位亦受到限制(如多用于测定叶片的  $WUE$  等)。

(2)田间水平上的广义概念 把  $WUE$  表述为单位蒸腾蒸发量的地上部干物质产量。可简单用下式表达:

$$WUE = DW/CW \quad (2)$$

式中,  $DW$  为地上部干物质质量;  $CW$  为蒸发蒸腾量。其单位一般为  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{hm}^{-2}$ ,即消耗单位水所获得的单位土地面积上的干物质质量,一般是指经济产量。蒸发蒸腾量可用水分平衡公式获得<sup>[7]</sup>。此表达方法的优点是简单明了,目的性强,便于理解和计算。缺点是单位的大小因土壤面积的不同而不同,反映的只是一个综合的最终结果,不能反映作物生育时期的某一阶段、某一部位的水分利用情况,难以分析植物组织瞬时的水分利用效率。

(3)区域水平上的综合概念 Gregory 等<sup>[8]</sup>为有利于全面分析水分利用率而制定了如下数学表达式:

$$WUE = ew / \{1 + (L + Es + R + D) / Et\} \quad (3)$$

式中,  $WUE$  仍然指单位水资源的生物量;  $L$  指在储存和运输过程中的损失量;  $Es$  为土壤蒸发或稻田里的水面蒸发量;  $R$  为径流量;  $D$  为作物根区的流失量;  $Et$  为作物蒸腾量;  $ew$  为蒸腾效率(单位蒸腾量固定的净  $\text{CO}_2$  量)。其单位与式(2)相同。此表达式考虑到田间或群体尺度的蒸腾与蒸发作用、水在根际间的流失等因素,反映的内容比较全面。缺点是比较复杂,难以操作,需分别计算蒸腾蒸发量等。

(4)应用碳同位素技术可间接测定比较作物的  $WUE$ <sup>[19-23]</sup>。

首先计算样品中的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  值与标准样品偏率的百分比:

$$\delta p = (Rp - Rs) / Rs \quad (4)$$

式中,  $Rp$  和  $Rs$  分别为植物和标准化石样品中的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  值与植物生长点空气中的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的比值,计算同位素的分辨率为:  $\Delta = (\delta a - \delta p) / (1 + \delta p)$

式中,  $\delta a$  为空气中的  $^{13}\text{C}$  组分。  $\Delta$  分别与植物的蒸腾速率和  $WUE$  呈负相关,据此可表示  $WUE$  的大小。可见它表示的是  $WUE$  的相对大小。

此方法的优点是测定的结果比较准确可靠,变异幅度较小,可用于比较不同基因型的差异,有利于育种者使用;而且采集的样品较少,并且测定不受时间和季节的限制。缺点是需使用昂贵的质谱仪进行测定。  $\Delta$  与田间测得的  $WUE$  及其产量的关系还有待研究证实。

以上 4 种方法各有优劣,在应用中可根据实际情况选择其一。例如,测定单个叶片的  $WUE$  一般用第一种方法;计算水分消耗与产量的关系则用第二种方法;第三种方法适合在生态系统等较大的尺度应用;第四种方法一般着重于反映植物较长期的  $WUE$  特性。

## 2 农业水分利用率对全球变化的响应

### 2.1 $\text{CO}_2$ 浓度的变化

未来  $\text{CO}_2$  浓度的升高对全球水分平衡的影响是显而易见的。其对植物的影响可以在叶片、冠层、群体以及不同的时空分布上加以阐明。 $\text{CO}_2$  浓度升高后,使叶片温度升高,气孔导度降低,蒸腾速率降低。 $\text{CO}_2$  浓度的升高积累,提高了单叶的  $WUE$ 。Dhakhwa 等<sup>[9]</sup>利用模型评估分析指出, $\text{CO}_2$  倍增使得玉米  $WUE$ (利用式 1)增加 28%~29%。然而由于  $\text{CO}_2$  浓度升高后,叶面积指数和叶持续期增大或延长,使冠层蒸散量增加,虽然单叶的  $WUE$  升高,但对于长期的群体  $WUE$  影响较小<sup>[24]</sup>,对作物总的水分利用影响也较小<sup>[25]</sup>。

$\text{CO}_2$  浓度升高能够缓解干旱胁迫的强度,延迟旱灾的发生<sup>[26]</sup>,但以春小麦为材料的研究结果表明,干旱使地上生物量和籽粒产量分别降低 15%和 19%,而提高  $\text{CO}_2$  分压则分别增加 24%和 29%,二者之间并无交互作用;在干旱条件下  $\text{CO}_2$  分压的提高只轻微地降低蒸腾速率,而冠层光合速率仍受到较大的激发,使单位蒸腾水量的净生长量提高 21%,大幅度地提高了水分利用率<sup>[27]</sup>。 $\text{CO}_2$  水平升高影响水分平衡的流程框图如图 1<sup>[24]</sup>。

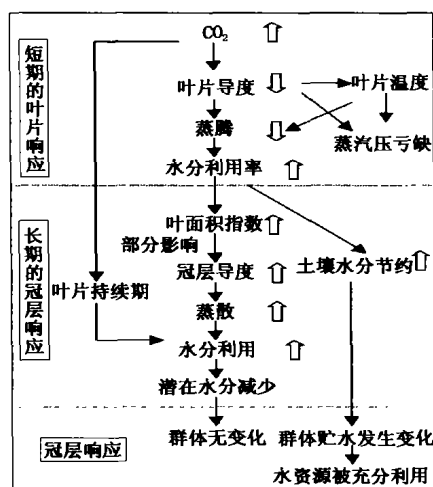


图1 植物的水分关系对CO<sub>2</sub>浓度升高的响应

Fig.1 Responses of relationship between water and plant to elevated CO<sub>2</sub>

株为了维持一定的水势对于干旱胁迫的一种适应<sup>[30]</sup>。近年来已有大量文献论述水分亏缺对植物生理生态适应和响应方面的研究进展,本文不再赘述<sup>[31]</sup>。

(2)节水灌溉 以麦田灌溉为例,随着灌水量的增加,土壤的水分状况随之改善,小麦的产量按直线—抛物线的复合模式变化,总耗水量呈直线上升,而以式(2)计算的WUE一般沿直线下降,旱作条件下的WUE较高。不同降水年型冬小麦的WUE不同,生育期间降水少而产量高的年份WUE高,过量供水时WUE急剧下降。供水不足使玉米各生育时期的光合速率、产量及WUE降低<sup>[32]</sup>。许振柱等<sup>[33]</sup>的研究结果表明,在大田栽培条件下,由于得到降水的补给,麦苗生长健壮,产量水分利用效率是没有得到降水补给的防雨池载小麦的2.2倍。大田栽培条件有利于冬小麦对土壤水分的利用;防雨池载条件下由于只有播前的供水,没有得到降水的补给,使冬小麦的水分利用率降低。灌水充足虽降低了WUE,但土壤过度缺水亦不利于WUE的提高,限量供水的研究结果表明,防雨池载条件下,冬小麦全生育期不灌水与生育中后期过多灌水均不利于提高冬小麦的WUE,而以只灌三水(底水、拔节水和孕穗水)的最高。

一些研究指出,WUE与土壤水分(W)的关系可表达为:

$$WUE = 85.139 \exp[-0.0153(W-12.812)^{-2}]$$

这说明在干旱半干旱地区土壤湿度较小是主要的限制因子,土壤水分状况的改善可显著提高作物的WUE<sup>[34,35]</sup>。

研究表明,玉米干湿交替处理可提高其叶片渗透调节能力,增加根灌比,使气孔导度和蒸腾速率降低,从而显著提高WUE<sup>[36]</sup>。而山仑等<sup>[37]</sup>的研究表明,干湿交替环境和全湿处理相比,小麦和马铃薯的WUE分别提高了56.67%和84.40%,对大豆的影响则不显著,而使玉米的WUE下降。这主要是水分条件对各物种干物质运输的影响不同造成的。

### 2.3 人类管理活动

如前所述,人类活动的影响加剧了全球变化的过程,而农业生产的管理手段和方式对水分利用效率也造成了显著影响<sup>[38,39]</sup>,分析这些过程对节约水资源,提高WUE具有重要的意义。

#### 2.3.1 土地整修

传统的修筑梯田方式有助于降水利用率(WUE,式3)的提高。万卓<sup>[38]</sup>的研究表明,梯田作

## 2.2 气候变化

### 2.2.1 温度

一般认为,随着叶片温度的升高,气孔关闭,叶肉细胞间CO<sub>2</sub>浓度C<sub>i</sub>升高,从而提高叶片的水分利用效率。有资料表明,棉花叶片在30℃、蒸气压亏缺(VPD)为3kPa时的WUE为3.5mmol(CO<sub>2</sub>)mol<sup>-1</sup>(H<sub>2</sub>O),而当温度升至40℃和VPD为6kPa的条件下,WUE仅为0.8mmol(CO<sub>2</sub>)mol<sup>-1</sup>(H<sub>2</sub>O)。前者是后者的4倍,而后者的VPD是前者的2倍,说明在高温条件下,气孔变化(关闭)也起了一半的作用<sup>[28]</sup>。但不同的基因型也表现出不同的适应性。Quisenberry等<sup>[29]</sup>证明,保水性能良好的基因型在热环境下能积累较多的干物质,对提高WUE有利,对于高温的适应有一定限度。

### 2.2.2 水分

(1)水分亏缺 适度的土壤水分亏缺提高了WUE<sup>[24]</sup>,随着土壤水分和植株水分含量的急剧下降,植株茎中的水分压力下降,引起植株水分传导力的下降,进而影响到光合作用的气体交换参数,降低水分利用率,这是植

物的生产力显著高于坡地,梯田的产量水分利用率也高于坡地 7.6%~9.7%。在渗水效果不佳的土壤表面挖掘蓄水沟也能有效增加降水渗入量,从而阻止径流<sup>[40]</sup>。浅耕或中耕能有效阻止径流。王俊鹏等<sup>[41]</sup>在宁南旱作农业区采用沟垄相间、垄上覆膜、沟内种植、垄面产流、沟内集水的微集水种植方式,使玉米的产量提高 67.9%~71.0%,水分利用效率达到 1.38~2.18kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup>。Stroosnijder等<sup>[42]</sup>在西非的研究结果表明,浅耕后使径流减少了 48.8%。Wallace<sup>[5]</sup>的实验结果也表明,干旱区浅耕种植玉米比对照每年多利用 60mm 降水。耕地后还能有效抑制土壤蒸发,主要原因是耕后可以阻断土壤毛细管,阻止深层水分向地表运动,从而有效地保持了土壤水分<sup>[43]</sup>。但也有的实验结果与此相反,这主要是由于不同土壤类型、质地等造成的<sup>[44]</sup>。

### 2.3.2 种植制度

单作、轮作、复种、休闲制度等不同的种植制度可显著影响作物的 *WUE*。Li 等<sup>[45]</sup>研究了不同种植方式对冬小麦 *WUE* 的影响,结果表明,麦田采用轮作方式的 *WUE* (产量/耗水量)比单作小麦的显著提高,前者平均为 1.53kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup>,而后者只有 0.94 kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup>。而种植休闲作物的 16 种轮作方式由于提高了对雨季降水的利用量,使 *WUE* 有所降低,但其中不同方式之间出现差异,仍有 5 种方式的 *WUE* 显著高于单作。农林间作也可有效减少径流,抑制作物蒸发,提高蒸腾效率,从而提高 *WUE*。Wallace 等<sup>[44]</sup>的研究结果表明,没有实施农林间作的农田降水的 59% 被蒸发掉,而实施间作的土壤被蒸发的量减少到 41%,每年平均可减少土壤蒸发量 117mm。Brenner<sup>[46]</sup>也同时用几种作物作出了类似的结果。景元书<sup>[47]</sup>的实验结果也指出,农林间作的小麦 *WUE* 均高于对照,说明间作田小气候有利于生理功能的正常进行。总之,实施农林间作有效地改善了田间小气候,这对树木和作物都是有利的。然而对于它们之间的关系以及土壤与气候间的互作效应还有待于进一步研究<sup>[5]</sup>。

### 2.3.3 土壤肥力及其施肥方式

一般来说,土壤肥力较高,有利于作物对土壤水分的吸收利用,形成较高的生物量和经济产量,从而提高 *WUE*。谢承陶等<sup>[48]</sup>在山东禹城的研究结果表明,麦田施入有机肥有利于提高冬小麦的 *WUE*。土壤有机质含量为 15.8 g·kg<sup>-1</sup> 的作物 *WUE* 比有机质含量为 7.2g·kg<sup>-1</sup> 的 *WUE* 提高 0.36~0.68kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup>,节水 23%~33%。灌水下限愈低,水分利用效率和节水效率愈高。刘忠民等<sup>[49]</sup>的报告指出,增施复合肥后水分利用效率由原来的 0.44 kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup> 提高到 1.00kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup>,提高了 1.27 倍。曹靖等<sup>[50]</sup>的试验结果表明,氮、磷与有机肥组合配施能显著提高冬小麦的产量,有利于提高土壤供水的比例,减少冬小麦的水分亏缺程度,提高了 *WUE*,其次为氮磷配合施用的,而以单施氮肥的 *WUE* 最低。

### 2.3.4 覆盖物和抗旱剂

有报道指出,麦田中有 40% 左右的水从棵间土壤表面蒸发掉。因此,采用覆盖方式减少地表蒸发,是促进 *WUE* 提高的有效措施<sup>[51]</sup>。覆盖秸秆的麦田与不覆盖的相比,耗水系数下降,小麦的产量水分利用率可由原来的 1.16 kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup> 提高到 1.43kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup>。在玉米田的试验结果也表明,覆盖聚乙烯薄膜和一种易降解膜(淀粉膜)产量水分利用率分别为 0.74 kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup> 和 0.75kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup>,而不盖的只有 0.56kg·m<sup>-3</sup>·hm<sup>-2</sup><sup>[52]</sup>。对作物叶面施用腐殖酸<sup>[53]</sup>、甜菜碱<sup>[54]</sup>、ABA 及其他混合物均可改善作物的光合性能,延缓衰老,起到提高 *WUE* 的作用<sup>[55]</sup>。一种土壤调节剂——合成超吸水聚合物(主要包括淀粉聚丙烯腈接枝共聚体、乙烯醇—丙烯酸合成类聚合物、丙烯酰胺—碱金属合成聚合物)在长期干旱的环境下有助于植物的成活与生长。研究表明,大麦和莜苳到达萎蔫点的时间随着聚合物浓度的增加而增加。施用聚合物促使作物干物质增加,最高处理水平比对照增产 4 倍,水分利用率增长 3 倍<sup>[56]</sup>。

## 2.4 其它综合因素

### 2.4.1 土壤条件

土壤条件对植物与水分的关系有较大影响,不同的土壤类型、土壤质地、土壤养分状况

等影响植物根系的生长。皇甫湘荣等<sup>[57]</sup>研究了不同潮土类型持水性能和水分利用特性,结果表明,以重壤类型的  $WUE$  最高,为  $2.37\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{hm}^{-2}$ ,以沙土的最低,为  $0.42\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{hm}^{-2}$ ,前者为后者的 5.64 倍。这说明重壤的保水能力强,有利于作物对土壤水分的利用。但当粘土地表面龟裂时,导致土壤水分无效蒸发。实验表明,当地表有 15cm 的沙层时,其下的水分将不受蒸发的影响,从而改变了粘土的蒸发状况,使沙下的粘土成为有效储水层<sup>[58]</sup>。研究表明,降水的季节分布影响作物根系的生长发育,以及土壤养分的吸收,而根系的庞大与否对抗御干旱至关重要<sup>[24,59]</sup>。

#### 2.4.2 区域特征

由于不同区域间水热环境条件、地质地貌特征以及人为因素的影响不同,造成了  $WUE$  间的差异较大。表 1 列举了玉米和冬小麦两种作物在不同区域的水分利用率,可以看出,各地区综合因素的差异引起了同一作物  $WUE$  的较大变异幅度。

表 1 不同区域的水分利用效率  
Table 1  $WUE$  of different regions

| 地区              | 作物  | 水分利用率   |                                 |
|-----------------|-----|---|---------------------------------|
|                 |     | $WUE$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{hm}^{-2}$ ) | 文献                              |
| Bushland,TX,USA | 玉米  | 1.20  | Rhoades 等(1990) <sup>[60]</sup> |
| CA, Davis,USA   | 玉米  | 1.70  | Rhoades 等(1990) <sup>[60]</sup> |
| Negev,Israel    | 玉米  | 1.90  | Rhoades 等(1990) <sup>[60]</sup> |
| 中国甘肃            | 玉米  | 1.86  | Li 等(2000) <sup>[41]</sup>      |
| 中国甘肃            | 冬小麦 | 0.90  | Li 等(2000) <sup>[41]</sup>      |
| 中国的半湿润区         | 冬小麦 | 1.48  | Zhu 等(1994) <sup>[61]</sup>     |
| 中国山东            | 冬小麦 | 1.42  | 笔者的试验                           |

#### 2.4.3 物种和品种

不同作物间的  $WUE$  显著不同。一般认为  $C_4$  植物的  $WUE$  高于  $C_3$  植物,前者为后者的 2 倍左右,尤其是温度较高时差异更显著。其主要原因是  $C_4$  植物在高温和高光照条件下具有较强的光合作用和较高的生长速率及较高的气孔阻力<sup>[17]</sup>。同一物种的不同品种之间的  $WUE$  也存在不同程度的差异。对于 17 个玉米自交系的研究结果表明,其单叶的  $WUE$  以自交系多 26 的最高,达到  $2.08\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{H}_2\text{O})$ ,最低的是 Mo17,为  $0.99\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{H}_2\text{O})$ ,17 个品系的平均值为  $1.48\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{H}_2\text{O})$ ,标准误差为 0.30,变异系数达 20.13%<sup>[16]</sup>。刘雅南等<sup>[39]</sup>研究了具代表性的我国玉米 10 个推广种的抗旱力,结果表明,不同杂交玉米品种的产量水分利用率差异较大,以遗长 10 号、掖单 4 号、农大 60 为代表的抗旱组的  $WUE$  较以中单 120、京单 841 号为代表的敏感组的  $WUE$  高 29.5%~58.3%。笔者的研究表明,抗旱性较强的冬小麦品种鲁麦 21 的平均产量水分利用效率为  $1.54\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{hm}^{-2}$ ,而抗旱性较弱的品种济南 17 为  $1.39\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{hm}^{-2}$ ,前者比后者高 10.79%,充分说明了基因型在  $WUE$  上表现出的差异。

此外,集水输水设施状况、田间水的再利用、水的亏漏和污染问题<sup>[9]</sup>以及植物的不同生长季节等<sup>[21]</sup>,都将影响到  $WUE$  的提高,因此,修建防渗渠、实施管道输水,实行微灌、喷灌、滴灌等,都可有效提高  $WUE$ 。

### 3 结论和展望

人类生活加剧了全球变化的过程,加之人口快速增加,世界范围内普遍面临水资源的危机。节约农业水资源,提高水分利用率,无外乎从两个方面入手,一是减少地表径流的渗漏,抑制蒸发,减少水资源的浪费;二是千方百计地提高蒸腾效率。前者主要通过采取物理工程、水文、农艺等方面的措施,而后者则主要通过植物生理、遗传育种、基因工程等措施。综合

起来,可用图 2 来表述。

为延缓干旱化的趋势,促进农业生产的可持续发展,保证在全球变化背景下中国的生态和粮食安全,应注重以下几个方面的研究:①在不同的层次和尺度上(叶片、个体、群体和区域等)研究农业  $WUE$  对未来  $CO_2$  浓度变化的响应和适应机理,阐明在不同层次和尺度上的内在联系;②进一步研究主要粮食作物对全球变化适应性反应,阐述可能引起的生物学特性变化及其环境效应,寻找提高  $WUE$  的方式和方法;③阐明气候变化中关键生态因子(温度、水分等)的交互作用对主要粮食作物  $WUE$  的影响,通过模拟的手段,提供在不同组合生态因子环境条件下提高  $WUE$  的选择方案;④加强节水技术的研究,采用转基因技术,开发节水抗旱品种,利用先进的工程节水设备(如微灌、喷灌和滴灌等),缓解全球变化对提高  $WUE$  的负面影响;⑤加强人类的生产管理方式与全球变化关系的交叉研究,通过优化管理模式提高农业水分利用率。

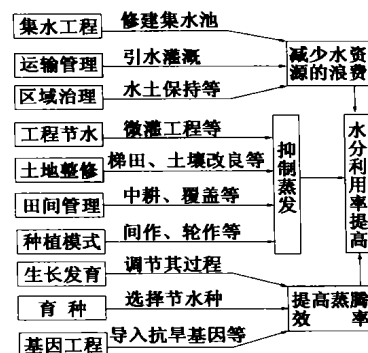


图 2 农业生态系统中提高  $WUE$  的模式图

Fig.2 The model of increasing  $WUE$  in agricultural ecosystem

### 参考文献(References):

- [1] 张新时,高琼,杨奠安,等. 中国东北样带的梯度分析及其预测[J]. 植物学报,1997,39(9):785~799. [ZHANG Xin-shi, GAO Qiong, YANG Dian-an, et al. A gradient analysis and prediction on the northeast China transect(NECT) for global change study. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(9): 785-799.]
- [2] 周广胜. 生态系统对干旱化的适应与调控机制[A].周广胜. 中国东北样带(NECT)与全球变化——干旱化、人类活动与生态系统[C]. 北京:气象出版社,2002.3~8.[ ZHOU Guang-sheng. Adaptation and adjustment mechanism of terrestrial ecosystems to aridification. In: ZHOU Guang-sheng ed. *Northeast China Transect(NECT) and Global Change-Aridification, Human Activity and Ecosystem*. Beijing: Meteorology Press, 2002.3~8.]
- [3] Rosenzweig C, Parry M L. Potential of climate change on world food supply[J]. *Nature*, 1994, 367(13): 132~138.
- [4] Wagner D. Scenarios of extreme temperature events[J]. *Climatic Change*, 1996, 33: 385~407.
- [5] Wallace J S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 82:105~119.
- [6] 丁一汇. 中国西部环境变化的预测[M]. 北京:科学出版社,2002.1~123. [DING Yi-hui. *Projection for the Future Environment in Western China*. Beijing: Science Press, 2002. 1~123.]
- [7] 秦大河,丁一汇,王绍武,等. 环境变化及其对中国西部的影响[J]. 地学前缘,2002, (9): 321~328. [QIN Da-he, DING Yi-hui, WANG Shao-wu, et al. A study of environment change and its impacts in western China. *Earth Science Frontiers*, 2002, (9): 321~328. ]
- [8] 山仑. 改善作物抗旱性及水分利用效率研究进展[A]. 邹琦,王学臣. 作物高产高效生理学研究进展.农作物高产高校抗逆生理基础研究文集[C]. 北京:科学出版社,1996.258~268.[ SHAN Lun. Researching progress of improving drought-resistance of crop and water use efficiency. In: ZOU Qi, WANG Xue-chen eds. *Researching Progress of High Yield and Efficiency of Crop Physiology. Basic Researching Collection of Stress-resistance Physiology of High Yield and Efficiency of Agricultural Crops*. Beijing: Science Press, 1996. 258~268.]
- [9] Dhakhwa G B, Campbell C L, LeDuc S K, et al. Maize growth: assessing the effects of global warming and  $CO_2$  fertilization with crop models[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87: 253~272.
- [10] Dingkuhn M, Farquhar G D, Dedatta S K. Discrimination of  $^{13}C$  among upland rice bearing different water use efficiencies [J]. *Aust. J. Agric. Res.*, 1992, 42: 1123.
- [11] Falkenmark M, Anderson L, Castensson, Sundblad K, et al. Water—a reflection of land use. Option for countering land and water mismanagement[Z]. Stockholm: Swedish Natural Science Research Council, 1999.

- [12] 于静洁,任鸿遵. 华北地区粮食生产与水供应情势分析[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 360~365. [YU Jing-jie, REN Hong-zun. Crop yield and water supply in North China. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(4): 360~365.]
- [13] Shiklomanov L A. The world's water resources [R]. In: Proceedings of the International Symposium to Commemorate 25 Year of the IHP. UNESCO/IHP. 1991. 93~126.
- [14] 王传胜, 尤飞, 薛东前. 内蒙古沿黄地区水资源利用矛盾的主要动因与缓解对策[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 579~589. [WANG Chuan-sheng, YOU Fei, XUE Dong-qian. The causes and alleviating countermeasures of the problems of water resources utilization in area along Yellow River in Inner Mongolia. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(5): 579~589.]
- [15] Fisher G, Heiling G K. Population momentum and the demand on land and water resources[J]. *Phil. Trans. Soc.*, 1997, 352: 869~889.
- [16] 王美云, 李少昆, 赵明. 关于玉米光合作用与叶片水分利用效率研究中的作用[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 345~352. [WANG Mei-yun, LI Shao-kun, ZHAO Ming. Relationship between water use efficiency and leaf photosynthesis of maize. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(3): 345~352.]
- [17] Gardiner F F, Pearee R B, Michell R L. Physiology of Crop Plants [M]. Ames: Iowa State University Press, 1985. 76~97.
- [18] Gregory P J, Warren G P, Simmonds C P. Interactions between plant nutrients, water and carbon dioxide as facts limiting crop yields[J]. *Phil. Trans. R.*, 1997, 352: 987~996.
- [19] 李秧秧. 碳同位素技术在 C<sub>3</sub> 作物水分利用效率研究中的作用[J]. 核农学报, 2000, 14(2): 115~121. [LI Yang-yang. Application of carbon isotope technique on the study of water use efficiency of C<sub>3</sub> crops. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2000, 14(2): 115~121.]
- [20] Bonal D, Barigah T S, Granier A, et al. Late-stage canopy tree species with extremely low  $\delta^{13}\text{C}$  and high stomatal sensitivity to seasonal soil drought in tropical rainforest of French Guiana[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2000, 23: 445~456.
- [21] 严昌荣, 韩兴国, 陈灵芝. 六种木本植物水分利用效率和小生境关系研究[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1952~1956. [YAN Chang-rong, HAN Xing-guo, CHEN Ling-zhi. Water use efficiency of six woody species in relation to micro-environmental factors of different habitats. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1952~1956.]
- [22] Francey R J, Gifford R M. Physiological influences of carbon isotope discrimination in huon pine (*Lagarobos franklinii*) [J]. *Oecologia*, 1985, 66: 211~218.
- [23] 林植芳, 彭长连, 林桂珠. 大豆和小麦不同基因型的碳同位素分馏作用及水分利用效率[J]. 作物学报, 2001, 27(4): 409~414. [LIN Zhi-fang, PENG Chang-lian, LIN Gui-zhu. Carbon isotope discrimination and water use efficiency in different soybean and wheat genotypes. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(4): 409~414.]
- [24] Mooney Ham Lanadell J, Chapin III F S, Ehleringer F A, et al. Ecosystem physiology responses to global change[A]. In: Walker B, Steffen W, Canadell J, Ingam J eds. The Terrestrial Biosphere and Global Change Implication for Natural and Managed Ecosystem[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 141~188.
- [25] Hsiao T C, Jakson R B. Interactive effects of water stress and elevated CO<sub>2</sub> on growth, photosynthesis and water-use efficiency[A]. In: Luo Y, Mooney H A eds. Carbon Dioxide and Environment Stress[C]. San Diego, CA: Academic Press, 1999. 3~32.
- [26] Vu J C V, Baker J T, Penanen A T, et al. Elevated CO<sub>2</sub> and water deficit effects on photosynthesis, ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase, and carbohydrate metabolism in rice[J]. *Physiologia Plantarum*, 1998, 103: 327~339.
- [27] Mitchell R A C, Mitchell V J, Lawlor D W. Response of wheat canopy CO<sub>2</sub> water gas-exchange to soil water content under ambient and elevated CO<sub>2</sub> [J]. *Global Change Biology*, 2001, 7: 599~611.
- [28] Rodin J W. Reconciling water-use efficiencies of cotton in field and laboratory[J]. *Crop Science*, 1992, 32: 13~18.
- [29] Quisenberry J E, Wendt C W, Berlin J D, et al. Potential for using leaf turgidity to select drought tolerance in cotton[J]. *Crop Sci.*, 1985, 25: 294~299.
- [30] Kolb K J, Sperry J S. Transport constraints on water use by the great basin shrub, *Artemisia tridentata* [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22: 925~935.
- [31] 许振柱, 周广胜. 作物对干旱的生理生态响应与适应研究进展[A]. 周广胜. 中国东北样带 (NECT) 与全球变化——干

- 旱化、人类活动与生态系统[C]. 北京:气象出版社,2002.191~204.[XU Zhen-zhu, ZHOU Guang-sheng. Progress on responses and adaptations of physiological ecology of crops to drought. In: ZHOU Guang-sheng ed. Northeast China Transect(NECT) and Global Change—Aridification, Human Activity and Ecosystem. Beijing: Meteorology Press, 2002. 191~204.]
- [32] 梁宗锁,康绍忠,李新有. 有限供水对夏玉米产量及其水分利用效率的影响[J]. 西北植物学报,1995, 15(1):16~31. [LIANG Zong-suo, KANG Shao-zhong, LI Xin-you. The effect of limited water supply on the yield and water use efficiency of summer corn. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 1995, 15(1): 16~31.]
- [33] 许振柱,于振文,董庆裕,等. 不同栽培条件下旱地麦田土壤水分变化规律[J]. 干旱地区农业研究,1996, 14(3):20~24,30. [XU Zhen-zhu, YU Zhen-wen, DONG Qing-yu, et al. Soil water variation laws in rain-fed wheat fields under different cultivation conditions. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1996, 14(3): 20~24, 30.]
- [34] 华北平原作物水分胁迫与干旱研究课题组. 作物水分胁迫与干旱研究[M]. 郑州:河南科技出版社,1991.78~79. [Program Team of Crop Water Stress and Drought Researching of North China Plain. *Crop Water Stress and Drought Researching*. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1991. 78~79.]
- [35] 刘雅南,曾孟潜. 十个玉米推广种抗旱力的分析[J]. 华北农学报,1995,10(1):45~50. [LIU Ya-nan, ZENG Meng-qian. Analyses for drought-resistance ten current spread hybrids maize in China. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1995, 10(1): 45~50.]
- [36] 梁宗锁,康绍忠,邵明安,等. 土壤干湿交替对玉米耗水特性及水分利用的影响[J]. 土壤学报,2001, 38(3):390~394. [LIANG Zong-suo, KANG Shao-zhong, SHAO Ming-an, et al. Effect of wetting and drying cycle of soil on consumption character of water by maize. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 390~394.]
- [37] 山仑,苏佩,郭李昆,等. 不同类型作物对干湿交替环境的反应[J]. 西北植物学报, 2000,20(2):164~170. [SHAN Lun, SU Pei, GUO Li-kun, et al. The response of different crops to drying and wetting cycle in field. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2000, 20(2): 164~170.]
- [38] 万卓. 宁南黄土丘陵区旱作梯田水分利用率分析[J]. 水土保持通讯,1996, 16(4):54~57. [WAN Zhuo. Analysis to water use efficiency of dry farming terrace in loess hilly region of southern Ningxia. *Bulletin of Soil and Conservation*, 1996, 16(4): 54~57.]
- [39] 霍治国,李世奎,安顺清,等. 干旱综合防御集成技术机制及在华北冬麦区的示范应用研究[J]. 自然资源学报,2002, 17(5):556~563. [HUO Zhi-guo, LI Shi-kui, AN Shun-qing, et al. Research on mechanism and application of integrated techniques for preventing winter wheat drought in North China. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(5): 556~563.]
- [40] BuHernoth J A. Hydrology of dryland catchment in southern Zimbabwe and impacts of climatic variation and land use change in shallow groundwater resources[D]. Ph.D. Thesis. UK: University of Reading, 1997.
- [41] 王俊鹏,马林,蒋骏,等. 宁南半干旱地区农田微集水种植技术研究[J]. 西北农业大学学报,1999, 27(3):22~27. [WANG Jun-peng, MA Lin, JIANG Jun, et al. Harvesting in semi-arid of Ningxia. *Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis*, 1999, 27(3): 22~27.]
- [42] Stroosnijder L, Hoogmoed W B. Crust formation on sandy soil in the Sabel. II. Tillage and its effect on the water balance [J]. *Soil Tillage Res.*, 1984,(4): 321~337.
- [43] Himm J E, Papendick R I, Campell G. Fallow tillage effects on evaporation and seed zone water content in a dry summer climate[J]. *Soil Sci. Am.J.*, 1981, 45(6): 1016~1022.
- [44] Wallace J S, Jackson N A, Ong C K. Modelling soil evaporation in an agroforestry system in Lenya[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1999,94:189~202.
- [45] Li F G, Zhao S L, Gballe G T. Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2000,79:129~142.
- [46] Brenner A J. Micro-climatic modification in aroforestry[A]. In: Ong C K, Huxley P A eds. *Tree-Crop Interaction—A Physiological Approach*[C]. UK: CAB International, Wallingford, 1996. 159~187.
- [47] 景元书,刘乃壮,吴洪颜. 农桐间作地热量平衡和水分利用状况研究[J]. 南京气象学院学报,1995, 18(4):560~565. [JING Yuan-shu, LIU Nan-zhuang, WU Hong-yan. Study of heat balance and water use efficiency in crop and paulownia in-



- tercropped field. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1995, 18(4):560~565.]
- [48] 谢承陶,李志杰,田昌玉. 土壤有机质在节水农业中的应用[J]. 土壤保持研究, 1996, 3(3):42~46. [XIE Cheng-tao, LI Zhi-jie, TIAN Chang-yu. The function of soil organic matter on economical water supply in agriculture. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(3): 42~46].
- [49] 刘忠民, 山仑, 邓西平. 施肥和密度对春小麦产量根系及水分利用的影响[J]. 水土保持研究, 1998, 5(1):713~717. [LIU Zhong-min, SHAN Lun, DENG Xi-ping. Output roots growth and water use of spring-wheat as affected by fertilization and density of plant. *Research of Soil and Water Conservation*, 1998, 5(1):713~717.]
- [50] 曹靖, 胡恒觉. 不同肥料组合对冬小麦水分供需状况的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5):713~717. [CAO Jing, HU Heng-jue. Effect of different fertilizer combinations on water supply demand status of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(5):713~717.]
- [51] 周凌云, 徐梦雄. 秸秆覆盖对麦田耗水量与水分利用率的影响的研究[J]. 土壤通报, 1997, 28(5):205~206. [ZHOU Ling-yun, XU Meng-xiong. The effects of straw covers on water consumption of wheat field and water use efficiency. *Chinese Journal of Soil Science*, 1997, 28(5):205~206.]
- [52] 王筋, 安鸣, 周柏玲, 等. 旱地玉米覆盖易降解淀粉膜的土壤水分动态研究[J]. 西北农业科学, 1997, 25(2):44~46. [WANG Jia, An Ming, ZHOU Bai-ling, et al. Study on soil water status corn mulched by starch-polyethene function film in dry land area. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 1997, 25(2):44~46.]
- [53] 孙立杰, 龚团莲, 宋彩芹. 腐殖酸对小麦叶片衰老的影响[J]. 内蒙古民族大学学报, 2001, 16(2):148~151. [SHUN Li-jie, GONG Tuan-lian, SONG Cai-qin. Effect of humic acid on senescence of blade of wheat. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities*, 2001, 16(2): 148~151.]
- [54] 杨淑英, 张建新, 吕家珑, 等. 外源甜菜碱对冬小麦抗旱性生理指标的影响研究[J]. 西北植物学报. 2000, 20(6):1041~1045. [YANG Shu-ying, ZHANG Jian-xin, LU Jia-long, et al. A study on effect of exogenous betaine on physiological index of drought resistance for winter wheat. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2000, 20(6):1041~1045.]
- [55] 陈靠山, 王升华, 柳春燕. 新型小麦抗旱剂的增产效果简报[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(4): 10~14. [CHEN Kao-shan, WANG Sheng-hua, LIU Chun-yan. The effect of a new type drought resistant reagent on wheat yield in rainfed land. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(4): 10~14.]
- [56] Woodhouse J, Johnson M S(党秀丽编译). 超吸水性多聚物对作物幼苗存活和生长的影响[J]. 水土保持科技情报, 2001, (3):17~19. [Woodhouse J, Johnson M S (DANG Xiu-li ed). Effects of over-absorption-water polymers on the surviving and growing of crop seedling. *Scientific and Technological Information of Soil and Conservation*, 2001, (3):17~19.]
- [57] 皇甫湘荣, 宝德俊, 张鸿程, 等. 土体构型对潮土持水能和水分利用的影响[J]. 水土保持研究, 1996, 3(3):114~107. [HUANGFU Xiang-rong, BAO De-jun, ZHANG Hong-cheng, et al. Effects of soil body configuration on water retention capacity and water utilization in Chao soil. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(3):114~107.]
- [58] 王玉辉, 周广胜, 黄培佑. 以龟裂地植丛发生演替为例探讨植物对环境的反应与反馈效应[J]. 植物资源与环境, 1999, 8(3):29~33. [WANG Yu-hui, ZHOU Guang-sheng, HUANG Pei-you. The responses of plant to environment and its feedback based on the general succession in takir. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1999, 8(3):29~33.]
- [59] 马忠明. 有限灌溉条件下作物-水分关系的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(2):75~79. [MA Zhong-ming. Studies on the relationship between crop and water under limited irrigation. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1998, 16(2):75~79.]
- [60] Rhoades F M, Bennett J M. Corn[A]. In: Steward B A, Nielsen D R eds. *Irrigation of Agronomy*[C]. USA: Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, WI. 1990. 567~637.
- [61] Zhu Z X, Stewart B A, Fu X G. Double cropping wheat and corn in a sub-humid region of China[J]. *Field Crops Res.*, 1994, 36: 175~183.

## Agricultural water use efficiency and its response to environments and managing activities

XU Zhen-zhu, ZHOU Guang-sheng

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, CAS, Beijing 100093, China)

**Abstracts:** Global change stands for the trend of modern world science. The interactions between global change and terrestrial ecosystems, which include water cycle, carbon cycle, food and fiber, serve as the core. Global temperature will rise and the precipitation pattern will be changed as a result of global change. Doubled CO<sub>2</sub> will cause global temperature increase by about 4°C, that will bring on change of water resource (±10%). After 50 years from 2000 onward, the temperature in western China will rise by 1.7°C~2.3°C, and the precipitation will increase by 5%~23% under condition of continual increase in CO<sub>2</sub> concentration. There will be a negative effect on grain yield based on global comprehensive factors, which includes overall climatic change, socio-economic change, and population increase etc., despite grain yield increase due to elevation of CO<sub>2</sub>. Global change will aggravate fresh water crisis of the world. According to prediction, fresh water will be insufficient for the essential need of the one sixth population in the world by 2050. Agriculture is the largest consumer of fresh water, accounting for about 75% of current water use. How to increase agriculture water use efficiency (WUE) has become a key task of saving fresh water resource, promoting sustainable use of fresh water resource and enhancing socio-economic development in arid or semiarid areas at present. The concepts and formulas of agriculture water use efficiency are different with various scales and application objectives. They mainly include physiological concept based on leaf level, general concept based on field level and comprehensive concept based on regional level. Elevated CO<sub>2</sub> can enhance crop WUE, but has a little effect on crop colony after long growing period. Moderate high temperature can promote crop WUE, but over high temperature is impossible for such an enhancement, and the soil moisture has the same situation. Run-off can be mitigated by building terraces, inter-tilling etc. There are significant effects of different planting patterns on crop WUE, for example, the capacity of soil evaporation will decrease from 59% to 41% by practicing intercropping of field crops with forest. There are also some effects of different soil fertilities, different fertilization methods, covers on field, different species and/or varieties etc. on crop WUE. The main principles for increasing WUE include decreasing run-off and evaporation, and promoting transpiration of crops. This review described model for increasing WUE based on three major paths, including engineering of water saving, agronomic management and methods of controlling physiological procedures, breeding and gene engineering etc. Several key researching directions are also put forward at the end of this paper.

**Key words:** agriculture; water resources; global change; water use efficiency; environments; management activities