

# 喷灌条件下作物光合作用及生长的研究进展<sup>20</sup>

姚素梅, 康跃虎

(中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:**就国内外有关喷灌条件下作物光合作用及生长的研究成果进行了分析和评述, 讨论了喷灌条件下作物的生态、生理因子之间的相互关系以及对农田小气候变化的适应机制, 指出了该领域研究中存在的问题和今后应加强的研究方向。

**关键词:** 喷灌; 光合作用; 作物生长; 机制

**中图分类号:** S510.1; S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)01-0199-06

传统农业灌溉多从满足作物的生物学需水以夺取高产的角度来确定灌溉定额, 对于如何使有限的水分取得最好的生产效益研究不足。面对水资源日益紧张的严峻形势, 采用先进的节水灌溉技术, 高效用水, 提高水分利用效率已经成为节水农业共同关注的焦点问题。喷灌作为一种先进的灌水技术, 在世界各国得到广泛应用, 并且灌溉面积在迅速增加, 喷灌在今后一段时期将是我国重点发展的节水技术之一<sup>[1]</sup>。

众多研究显示, 喷灌水滴和冠层截留蒸发消耗了一部分热量, 改变了田间的辐射平衡, 影响到冠层的温度和湿度、以及周围的水汽状况<sup>[2~4]</sup>。光合作用是植物最重要的生理活动, 它与光照、温度、湿度、水分等农田气候要素之间关系密切, 其中气孔作为作物体内、外二氧化碳和水分进行交换的基本门户, 其开放程度在受到环境条件影响的同时, 势必会反作用于作物对二氧化碳的同化和水分的利用, 从而导致光合作用强度的差异, 因此喷灌条件下农田小气候要素的变化必将对作物的光合作用产生重要影响。蒸发和蒸腾过程是水分平衡的主要决定因素, 对作物生长有很大影响。作物的生产力取决于光合过程的效能, 而喷灌条件下农田环境要素的变化, 特别是作用于光合作用的温度和湿度的变化控制了作物本身的光合和蒸腾作用行为, 影响植株体内的生理代谢, 进而影响作物的生长。因此研究喷灌条件下作物光合作用及生长的变化无论在理论上还是在实践中都具有十分重要的意义。本文就国内外有关喷灌

条件下作物光合作用(光合速率、蒸腾速率、水分利用效率)及作物生长的研究进展进行综述, 并就喷灌条件下作物对小气候变化响应的生理生态机制进行分析, 指出了今后应加强的研究方向。

## 1 喷灌条件下作物光合作用

### 1.1 喷灌条件下作物光合速率

空气温度和湿度是影响作物生长发育的重要环境因素之一。Terry<sup>[5]</sup>报道高温对生物体细胞产生直接的破坏, 使细胞膜损伤, 光合速率下降, 阻碍干物质的合成, 表现为叶冠减小、叶片早衰。空气湿度不仅直接影响植物的生长和代谢, 而且影响植物光合和气孔等生理因素。低的空气湿度引起保卫细胞的薄壁部分失水加快, 使气孔部分关闭、气孔导度变小, 导致细胞间隙CO<sub>2</sub>浓度降低从而使光合速率下降(Berkowitz 和 Gibbs, 1983)<sup>[6]</sup>。大量试验结论显示, 在辐射强、温度高、湿度小的情况下, 喷灌通过喷洒水滴和冠层截留水的蒸发, 可以降低冠层和地表的温度, 提高冠层内外的湿度。由于喷灌对田间小气候的影响, 部分学者研究了喷灌条件下作物的光合速率。杨晓光等<sup>[7]</sup>发现喷灌使冬小麦的冠层温度较畦灌约低5℃, 全天处于20~25℃之间, 位于光合作用的适宜温度范围内, 而畦灌冠层温度的范围为25~30℃, 超出了光合作用的适宜温度范围, 表现出喷灌条件下冬小麦的光合速率大于畦灌条件下的光合速率。陈志银<sup>[8]</sup>在对桑树的喷灌试验中发现, 在夏秋季节, 喷灌桑园与对照区(不灌溉)相比, 相对湿度增

<sup>20</sup>收稿日期: 2004-10-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金(40125002)资助

作者简介: 姚素梅(1974-)女, 河南栾川县人, 博士研究生, 主要从事农业水资源高效利用技术和机理的研究。

通讯作者: 康跃虎, 中国科学院地理科学与资源研究所研究员, 博士生导师。

大4%~8%，地面和叶冠温度分别降低0.2~8.0℃和0.1~1.5℃，喷灌可使叶片的光合速率提高0.00709~0.01244 mg/(cm<sup>2</sup>·h)。游恺哲<sup>[9]</sup>的研究结果表明，秋季晴天喷灌后，番荔枝的叶片温度平均下降3.6℃，叶片含水量提高了20.7%，由于喷灌后环境温度较接近光合适温，且叶片保持有充足的水分，净光合速率的日平均值提高了16.9%。Milford等<sup>[10]</sup>观测到，在高光强高蒸腾的条件下，即使土壤里有充足的水分供应，中午喷雾灌溉仍可促使糖甜菜气孔较大的开放，而且发现喷雾植株比滴灌植株保持了较高的植物水势和光合速率。这些研究结果表明，在高温天气条件下，喷灌调节作物冠层的温度，改善了作物生长的农田环境，使叶片的温度处于光合作用较适宜的温度范围内，作物的光合速率得到提高。

喷灌对作物光合速率另一重要影响表现为缓解光合日变化中的光合“午休”现象。在自然条件下，植物光合作用的日变化曲线大体上有两种类型：一种是单峰型，中午光合速率最高；另一种是双峰型，上午和下午各有一高峰，双峰型中午的低谷就是通常所说的光合作用“午休”现象<sup>[11]</sup>。许大全等<sup>[12]</sup>认为中午高温低湿造成叶片水汽压差增加，气孔部分关闭是华北地区冬小麦光合“午休”的重要原因之一，在田间试验中发现，冬小麦净光合速率的降低与空气饱和差的上升有很大关系，喷灌可提高空气相对湿度，降低叶片水汽压差和叶温，提高叶片含水量，增加气孔导度，减少气孔因素对光合作用的限制，使光合速率得到提高，解除华北地区小麦光合“午休”现象。郑国生等<sup>[13]</sup>研究了干热天气条件下大豆的光合午休及其形成原因，并对喷灌效应进行分析，结果表明：诱发大豆光合午休的原因是高温低湿；喷灌可明显地提高空气湿度，降低空气温度，增加群体光合速率，减轻光合“午休”现象。与此相似的还有Cock等<sup>[14]</sup>的报告，在高温低湿天气条件下，通过中午人工喷雾增加木薯冠层的空气湿度，与不喷水的对照相比，单位叶面积的光合速率提高，光合“午休”现象明显减弱。这些事实表明，在农业生产上有可能找到合适的措施，用喷灌或微量喷灌改善田间小气候状况，减轻作物光合“午休”现象，减小干热极端天气对作物造成的胁迫，使作物光合速率得到提高，增加作物产量。

## 1.2 喷灌条件下作物蒸腾速率

作物蒸腾是作物维持水分代谢和体温的重要途

径。蒸腾速率受叶片气孔阻力的控制，也受环境因子的影响和土壤水分供应的限制，在一定程度上可反映作物调节水分损失和对环境的适应能力。在土壤水分供给充足的条件下，叶片的蒸腾速率主要和叶片气孔内外的气压差有关，由于温度对饱和水汽压差的影响，喷灌条件下温度和湿度的变化通常是同时发生的，二者协同影响作物的蒸腾速率。Steiner等<sup>[15]</sup>报道，喷灌后农田中的蒸腾减少，这是喷灌后农田中水汽压差减小和温度降低的共同结果。Tolk等<sup>[16]</sup>报道，由于喷灌后农田中湿度提高和温度降低，喷灌后作物的蒸腾量至少减少了50%，在温度较高的天气情况下，作物蒸腾量下降的比例还会进一步增大。Thompson等<sup>[17]</sup>研究得到，在喷灌当天，使用摇臂式喷头和折射式喷头进行喷灌可使冠层在较长时间内处于湿润状态，叶片的湿润导致叶片温度降低和冠层内的水汽压下降，二者的蒸腾量都小于未进行灌水的对照。喷灌条件下桑树叶片的蒸腾速率下降0.00692~0.01598 mg/(cm<sup>2</sup>·h)<sup>[8]</sup>。在春小麦灌浆初期，喷灌后2天，空气温度降低3.7~4.9℃，0~20 cm土壤温度降低1.5~2.0℃，这种效应对抑制作物的蒸腾具有一定的作用<sup>[3]</sup>。上述研究结果表明，在辐射强、温度高、湿度小的情况下，喷灌通过喷洒水滴的蒸发，使作物冠层附近的水汽压较高，温度降低，作物的蒸腾速率降低，避免了由于过度蒸腾而导致的叶片水分亏缺。但是喷灌条件下叶片蒸腾速率和对应的光合有效辐射、气孔导度、叶温和水汽压差等环境因子模式关系的研究鲜有报道，使喷灌条件下环境因子对作物蒸腾影响的研究存在局限性，很难从机理上解释喷灌环境因子对作物蒸腾速率的影响。

## 1.3 喷灌条件下作物水分利用效率

水分利用效率受农田环境影响的因素较多，凡影响光合和蒸腾作用的环境因素均影响水分利用效率，其中空气湿度和光照强度对水分利用效率影响最明显<sup>[18]</sup>。提高作物的水分利用效率是实现高效用水的中心和潜力所在，作物的水分利用效率，通常是指作物消耗单位水分所获得的产量，反映了作物耗水与其产量之间的关系，是作物节水研究的重要内容。作物耗水量包括棵间蒸发和作物蒸腾两部分，当作物冠层全部覆盖地表以后，田间的耗水量主要为作物蒸腾。喷灌可以根据作物的生长和周围的环境状况，有效的调节田间小气候，从而影响作物的蒸腾量，进而影响作物的耗水量和水分利用效率。杨晓光

等<sup>[7]</sup>在华北平原高产区河北藁城试验站研究了喷灌对冬小麦水分利用效率的影响,得到喷灌和畦灌条件下冬小麦的耗水量分别为432.0 mm和542.1 mm(冬小麦生育期间的降雨量为111.7 mm),冬小麦的水分利用效率分别为1.92 kg/m<sup>3</sup>和1.41 kg/m<sup>3</sup>,喷灌条件下的水分利用效率较畦灌条件下提高36.2%。宫飞等<sup>[19]</sup>在该试验站的研究得到了相似的结论,喷灌和畦灌条件下冬小麦的耗水量分别为402.7 mm和531.3 mm(冬小麦生育期间的降雨量为62.3 mm),水分利用效率分别为2.10 kg/m<sup>3</sup>和1.44 kg/m<sup>3</sup>,喷灌条件下的水分利用效率较畦灌条件下提高51.5%。刘海军等<sup>[20]</sup>在华北平原山东禹城农业综合试验站两年的试验结果也证明了上述结论,在2000~2001年冬小麦生长季节(干旱年份),喷灌和畦灌条件下冬小麦的耗水量分别为436.5 mm和459.4 mm,冬小麦的水分利用效率分别为1.47 kg/m<sup>3</sup>和0.97 kg/m<sup>3</sup>;在2000~2001年冬小麦生长季节(湿润年份),喷灌和畦灌条件下冬小麦的耗水量分别为367.8和476.0 mm,冬小麦的水分利用效率分别为1.56 kg/m<sup>3</sup>和1.15 kg/m<sup>3</sup>。以上试验结果显示,与畦灌相比,在不同的气候条件下,作物的耗水量小,水分利用效率高,而且通过年际间试验结果比较可以进一步发现,在作物生育期降雨较少的年份,喷灌的节水增产效应更加明显,水分利用效率较畦灌提高的幅度更大。但是由于不同作物、同一作物的不同品种、同一品种不同生育期的需水及对水分敏感性不同,故喷灌影响作物产量的复杂性不容忽视,上述结论尚需进一步验证研究。

作物灌溉供水一般分为充分灌溉和非充分灌溉,近年实施节水同时探索了最大限度合理利用有限水资源、提高水分利用效率和产量的有效途径,非充分喷灌在农业节水理论中的研究逐渐受到重视。谢森传等<sup>[21]</sup>通过建立高产高效冬小麦节水喷灌模式,得到最优灌溉定额条件下非充分喷灌冬小麦的耗水量仅为286 mm,冬小麦的水分利用效率为2.43 kg/m<sup>3</sup>。饶碧玉等<sup>[22]</sup>对冬小麦节水高效非充分喷灌模式进行了5 a的研究,得到冬小麦平均耗水量为317 mm,水分利用效率平均为2.0 kg/m<sup>3</sup>。Abdul-Jabbar等<sup>[23]</sup>报道,在非充分喷灌条件下紫花苜蓿的水分利用效率可达0.009~0.014 t/(hm<sup>2</sup>·mm),而畦灌溉条件下为0.006~0.008 t/(hm<sup>2</sup>·mm)。表明采用非充分喷灌技术可以使作物的水分利用效率保持较高水平,较充分喷灌更节水增产。由于作物水分

利用效率与环境因素之间关系目前报道甚少,喷灌条件下环境因素对作物水分利用效率的作用机制尚不清楚,探讨喷灌条件下作物水分利用效率与环境因素的数量化关系应该成为今后研究所追求的目标。

## 2 喷灌条件下作物的生长

生长是作物对水分敏感的生理过程,作物的生长过程表现为细胞分裂和细胞扩张,因而影响株高、叶片扩展、根系伸长等。叶片是作物光合作用等生理代谢过程的主要器官,叶面积大小对作物干物质积累和产量影响很大。不少学者就喷灌条件下作物的生长进行了研究。尽管他们所用的材料和控制的条件下不同,但得出了许多相似或相同的结论。

### 2.1 喷灌条件下作物地上部分的生长

Kang等<sup>[24]</sup>报道,在拔节前,喷灌处理的分蘖数高于畦灌,至收获期喷灌和畦灌的分蘖数比较接近,说明冬小麦前期通过喷灌可以减小无效分蘖数,使有限的肥水集中于促大分蘖;在拔节期,喷灌条件下冬小麦的叶面积指数(LAI)小于畦灌条件下,至抽穗期二者LAI比较接近,但在灌浆至成熟期,喷灌条件下冬小麦的LAI下降缓慢。表明冬小麦前期通过喷灌可以减小无效的肥水消耗,使营养生长和生殖生长相协调,在后期又能维持较高的LAI提供较充足的干物质满足籽粒灌浆结实,获得较高产量,三年的试验结果显示喷灌比畦灌增产10.1%~44.3%。从上述试验结果可以看出,喷灌条件下冬小麦群体生长的优势主要表现在生长中后期,表现为作物生长向着有利于产量形成的方向发展。喷灌和畦灌条件下土壤水分时空变异可能是造成上述生长效应的主要原因;畦灌灌水量比较大,但灌水周期长,分蘖期较多的灌水量,易使植株前期营养生长过于旺盛,引起叶面积系数快速增加,形成了较大的株型群体。虽然冬小麦产量形成需要前期有一定的叶面积指数,但麦田群体太大,反而不利于后期经济产量的形成,使后期群体生长率下降<sup>[25]</sup>。而喷灌条件下灌水量较小,灌水周期短,灌水量分布均匀,协调了水分在不同生育阶段的分布,使植株前期生长稳健,达到了一定的叶面积指数,生育后期灌水量占总灌水量的比例高,调节了植株的水分状态,植株代谢活动增强,生育后期群体生长率较高。因此从整个生育期分析,喷灌条件下的土壤水分分布更适宜于冬小麦的正常生长。

## 2.2 喷灌条件下作物地下部分的生长

要科学的了解作物生长,就必须全面的认识作物地下部分根系生长、根系分布、不同生育期根系吸收水分养分的活力,以及不同环境下的根系变化。刘海军等<sup>[26]</sup>对喷灌条件下冬小麦根系生长进行了研究,结果表明,在土壤表层(0~40 cm),喷灌条件下冬小麦根长密度和根重密度要大于畦灌处理,根长和根重所占比例均大于畦灌条件下,在40 cm以下,根长密度和根重密度要小于畦灌处理,根长和根重所占比例均小于畦灌条件下,但从总体数量上分析,喷灌条件下的根重和根长均大于畦灌。喷灌条件下的根重和根长均大于畦灌,Bai等<sup>[27]</sup>关于灌溉方式对紫花苜蓿根系影响的研究和Wright等<sup>[28]</sup>对高粱在喷灌和沟灌下根系生长和分布的试验也证明了这一结果。由于喷灌条件下养分的运移特性不同于畦灌,畦灌入渗条件下, $\text{NO}_3^-$ 运移快,入渗结束后, $\text{NO}_3^-$ 集中分布在土壤深层的作物主根区之外,而在喷灌入渗条件下, $\text{NO}_3^-$ 运移慢,入渗结束后, $\text{NO}_3^-$ 的峰值迁移浅, $\text{NO}_3^-$ 集中分布在土壤表层作物主根区内<sup>[29]</sup>,因此可以认为喷灌条件下作物根系的这种分布规律有利于养分水分的吸收利用,从而有利于作物地上部分的生长。但由于根系吸水吸肥部位随根系发育阶段的不同而变化,且有植物种间差异,不存在一个统一的范围,对整株植物根系而言,不同根龄、不同部位根的吸水吸肥能力是不同的<sup>[30]</sup>,因而上述研究结果尚待进一步深入研究。

## 3 喷灌条件下作物对农田小气候变化响应的生理生态机制

中午高温低湿造成叶片水蒸汽压差增加,气孔部分关闭,光合速率下降,这是华北地区光合“午休”的重要原因之一。研究证明,气孔的部分关闭、低的空气湿度分别是导致光合作用下降的重要生理、生态因子。低的空气湿度、高的水蒸汽压亏缺不仅会直接影响气孔开度,还会通过某种非气孔限制影响叶片的净光合速率。高温低湿胁迫引起气孔部分关闭有以下3种可能:(1)高温低湿胁迫初期气孔导度的增加以及微小的增温效应引起叶片蒸腾速率增强使保卫细胞失水;(2)高温低湿引起的保卫细胞失水促进ABA的产生,ABA的累积导致气孔导度降低,并且有较长时间的后效应;(3)较长时间的高温低湿对保卫细胞中叶绿体的光系统造成一定程度的破坏,减少光下气孔开放所需要的能量供应。Rubisco

作为光合碳同化的关键酶,其活性高低直接影响光合速率的大小,因此,Rubisco活性降低常被作为引起光合下降的非气孔因素之一。植物体内的Rubisco活性受环境因子的这种影响主要通过Rubisco活化酶来调节<sup>[31, 32]</sup>,Rubisco活化酶需合适的pH及ATP参与才能起调节作用。高温、低湿等环境因素使植株蒸腾剧烈,容易导致叶绿体基质pH改变及光合磷酸化受阻而使ATP供应减少,从而影响Rubisco活化酶的正常功能,进而影响Rubisco的活化,导致光合速率下降<sup>[33]</sup>。

喷灌后,水滴和冠层截留蒸发消耗了一部分热量,改变了田间的辐射平衡,影响到冠层附近的温度、冠层的温度、以及周围的水汽状况,作物生长的微环境因子发生变化,喷灌可明显降低冠层附近的温度,增加冠层附近的湿度,使农田水汽压增加。喷灌后叶片光合速率增加和蒸腾速率降低的原因可做出如下分析:夏季高温低湿情况下喷灌后,(1)作物冠层温度位于光合作用较适宜温度范围内,改善了田间生态环境,Rubisco酶活力提高<sup>[34]</sup>,使作物的光合速率提高;(2)湿度的增加有利于气孔的开放,而气孔是控制叶片内外水汽和 $\text{CO}_2$ 扩散的门户,使胞间 $\text{CO}_2$ 浓度上升,直接影响光合速率,使叶片一天中的气体交换主要发生在上、下午光合较高而蒸腾较低的那部分时间里。(3)喷灌可使叶片在长时间内保持湿润状态,叶片蒸发面积减小,另一方面叶片内外的饱和水汽压差也减小。饱和水汽压差宏观上可以代表农田空气湿度状况,饱和水汽压差越小,相对湿度越大。饱和水汽压差微观上,可以表征为气孔水分蒸腾的驱动力或称为蒸腾驱动势,饱和水汽压差的减小,降低了喷灌田间蒸腾水分驱动势,使蒸腾速率降低。

## 4 研究展望

综上所述,近年来随着不同学科的交叉渗透,研究者在喷灌条件下的农田小气候效应、作物的光合作用、耗水和生长过程等方面做了大量研究工作,并取得了重要进展。前人的研究结果显示,喷灌改善了农田小气候,使光合作用处于适宜温度范围内,提高了光合速率;喷灌后水汽压差减小,使作物的蒸腾速率降低;喷灌条件下作物生长向着有利于产量形成的方向发展,并得到了与畦灌相比,喷灌条件下作物耗水量小、水分利用效率高的结论。但现有的研究大多局限于喷灌条件下小气候改善后光合作用本身的

变化和作物生长过程,而对喷灌条件下作物光合生理过程及其作用机制研究尚不够,从作物整体角度系统分析喷灌条件下作物光合作用在不同生育期以及一天当中的日变化规律尚需系统研究,有关喷灌条件下作物生长和环境因素之间关系的报道甚少。因此在来来的研究中,开展喷灌条件下作物光合作用及其有关生理过程与周围环境数量化关系的研究将成为主要目标,这对于解释作物产量的变化和提水水分利用效率具有重要的意义。作物水分吸收与耗散过程、CO<sub>2</sub>的同化作用和光合产物的积累与分配等生长过程,是作物本身不同器官和它所在的环境相互作用、反馈影响的结果。因此,从整体上和相互作用上研究喷灌条件下农田环境因子对作物生长影响的机理与效应,以及建立喷灌条件下作物生长模型,作物同化物的分配模型,对指导喷灌在节水农业中的应用具有一定的科学意义。由于土壤环境的复杂性和研究手段的限制,目前喷灌条件下根系吸水过程、根系水力学参数与地上部生长过程的关系是地下部分生长研究的薄弱环节,加强此方面的深入研究将有助于作物节水增产机理的阐明和干旱地区作物生产力的提高。因此,未来的研究应注重以下几个研究方向:(1)喷灌条件下作物光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率动态的变化,探讨喷灌条件下光合速率—蒸腾速率—气孔导度—水分利用效率与农田环境因子的关系;(2)喷灌条件下作物光合作用关键酶Rubisco活性和动态的变化;(3)喷灌条件下作物干物质积累与分配、产量形成的过程,建立喷灌条件下作物生长模型,作物同化物的分配模型;(4)喷灌条件下根系吸水过程、根系水力学参数与地上部生长过程的关系。

#### 参考文献:

- [1] 李英能. 对我国喷灌技术发展若干问题的探讨[J]. 节水灌溉, 2000, (1): 1-3.
- [2] Kang Y H, Liu H J, Liu S P. Effect of sprinkler irrigation on field microclimate [A]. ASAE. Proceedings of the 2002 ASAE annual international meeting/VX CIGR world congress [C]. Chicago: ASAE, 2002.
- [3] 杜尧东, 王 建, 刘作新, 等. 春小麦田喷灌的水量分布及小气候效应[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 398-400.
- [4] Ziaei A N, Sepaskhah A R. Model for simulation of winter wheat yield under dryland and irrigated conditions [J]. Agricultural water management, 2003, 58: 1-17.
- [5] Terry A. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture [J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 281-289.
- [6] Berkowitz G A, Gibbs M. Reduced osmotic potential effects on photosynthesis: identification of stomatal activation as mediating factor [J]. Plant Physiology, 1983, 71 (4): 905-911.
- [7] 杨晓光, 陈 阜, 宫 飞, 等. 喷灌条件下冬小麦生理特性及生态环境特点的试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 35-37.
- [8] 陈志银. 桑园喷灌的农业气象效应分析[J]. 杭州大学学报(自然科学版), 1996, 23(1): 92-98.
- [9] 游恺哲. 喷灌对番荔枝光合作用的影响[J]. 园艺学报, 1999, 26(6): 400-401.
- [10] Milford G F, Marcel R, Schmid M, et al. Coupling soil-plant-atmosphere exchange of ammonia with ecosystem functioning in grasslands [J]. Ecological Modeling, 2002, 158(2): 83-110.
- [11] 陈为钧, 赵贵文, 顾月华. Rubisco的研究进展[J]. 生物化学与生物物理进展, 1999, 26(5): 433-436.
- [12] 许大全. 光合作用“午睡”现象的生态、生理与生化[J]. 植物生理学通讯, 1990, (6): 5-10.
- [13] 郑国生, 邹 琦, 赵世杰. 田间大豆群体光合午休及喷灌效应[J]. 华北农学报, 1994, 9(1): 44-47.
- [14] Cock J H, Amaya A, Bohorquez C, et al. Simulation of production potential of self-defoliating sugarcane cultivars [J]. Field Crops Research, 1997, 54 (1): 1-8.
- [15] Steiner J L, Kanemasu E T, Clark R N. Spray losses and partitioning of water under a center pivot sprinkler system [J]. Trans ASAE, 1983, 20: 1128-1134.
- [16] Tolk J A, Howell T A, Steiner J L, et al. Role of transpiration suppression by evaporation of intercepted water in improving irrigation efficiency [J]. Irrigation Science, 1995, 16: 89-95.
- [17] Thompson A L, Martine D L, Norman J M, et al. Testing of a water loss distribution model for moving sprinkler system [J]. Trans ASAE, 1997, 40: 81-88.
- [18] 黄占斌, 山 仑. 水分利用效率及其生理生态机理研究进展[J]. 生态农业研究, 1998, 6(4): 19-23.
- [19] 宫 飞, 陈 阜, 杨晓光, 等. 喷灌对冬小麦水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(5): 30-34.
- [20] 刘海军, 康跃虎, 刘士平. 喷灌对冬小麦生长环境的调节及其对水分利用效率影响的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 46-51.
- [21] 谢森传, 惠士博. 高产高效小麦节水喷灌模式研究[J]. 灌溉排水, 1996, 15(4): 14-18.
- [22] 饶碧玉, 谢森传. 喷灌条件下冬小麦非充分灌溉试验研究[J]. 节水灌溉, 2001, 3: 13-15.
- [23] Abdul-Jabbar A S, Sammis T W, Lugg D G, et al. Water use by alfalfa, corn and barley as influenced by available soil water [J]. Agricultural Water Management, 1983, 6: 351-363.
- [24] Kang Yaohu, Liu Haijun, Yao Sumei. Effect of Sprinkler Irrigation on Crop's Growth [A]. Huang G H, Pereira L S. Proceedings of the 2004 CIGR International Conference [C]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. 414-425.
- [25] 居 辉, 兰 霞, 周殿熙, 等. 不同时期灌溉对冬小麦物质积累

- 与分配的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 66-71.
- [26] 刘海军. 喷灌条件下近地面气象要素分布特征及其对作物生长的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [27] Bai W M, Li L H. Effect of irrigation methods and quota on root water uptake and biomass of alfalfa in the Wulanbuhe sandy region of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 62: 139-148.
- [28] Wright G C, Foale M A, Charles-Edwards D A. Nitrogen nutrition of grain sorghum under sprinkler and furrow irrigation in the tropical dry season. I. Plant establishment, nitrogen uptake, and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 1985, 12: 203-222.
- [29] Sun zeqiang, Kang Yaohu, Liu Haijun. Studies on Soil Water and Nitrate Distribution under Sprinkler Irrigation Conditions [A]. Huang G H, Pereira L S. Proceedings of the 2004 CIGR International Conference[C]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. 1289-1295.
- [30] 邵明安, 黄明斌. 土-根系统水动力学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000. 131-155.
- [31] Pertis A R. Regulation of ribulose<sup>1, 5</sup>-bisphosphate carboxylase/oxygenase activity [J]. *Ann Rev Plant physiology*, 1992, 43: 415-437.
- [32] Andrews T J, Spencer M W. Manipulating ribulose bisphosphate carboxylase/oxygenase in the chloroplasts of higher plants[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2003, 414 (2): 159-169.
- [33] Crafts-Brandner S J, Salvucci M E. Rubisco activase constrains the photosynthetic potential of leaves at high temperature and CO<sub>2</sub> [J]. *Science*, 2000, 287: 476-479.
- [34] Yao Sumei, Kang Yaohu, Liu Haijun. Effects of Sprinkler Irrigation on Photosynthesis Features of Winter Wheat [A]. Huang G H, Pereira L S. Proceedings of the 2004 CIGR International Conference [C]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. 454-459.

## A review of studies on the effects of sprinkler irrigation on photosynthesis and growth of crops

YAO Su-mei, KANG Yue-hu

*(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, China)*

**Abstract:** The research progresses on the effects of sprinkler irrigation on photosynthesis (photosynthesis rate, transpiration rate, water use efficiency) and growth of crops is reviewed and analyzed. The relationships among different ecological and physiological factors and their adaptation mechanism to field microclimate changes under sprinkler irrigation condition are expatiated. Finally, the current problems to be solved and the directions of future research are pointed out.

**Key words:** sprinkler irrigation; photosynthesis; crop growth; mechanism