

徐同庆,陶健,王程栋,等.我国不同生态区烟田水分利用效率的格局与影响因素[J].江苏农业科学,2018,46(14):1-5,14.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.14.001

我国不同生态区烟田水分利用效率的格局与影响因素

徐同庆^{1,2},陶健¹,王程栋¹,刘光亮¹,宋文静¹,王树声¹,徐宜民¹

(1. 中国农业科学院烟草研究所,山东青岛 266101; 2. 中国农业科学院研究生院,北京 100081)

摘要:烟田生态系统水分利用效率(water use efficiency, WUE)是烟田碳、水循环过程的关键因子。基于不同烟区气候差异阐明烟田生态系统 WUE 研究的重要性,综述了烟田生态系统 WUE 的时空特征及其驱动机制,为中国不同烟区水资源利用率的提高提供理论支持。我国主要烟区气温、降水、辐射等环境因子时空分布不均,阶段性干旱和涝害频发,烟田生态系统 WUE 研究亟待加强。已有研究表明,南方烟区烟田 WUE 普遍高于北方;烟田生态系统 WUE 在日变化上呈先迅速升高到达峰值,后缓慢下降,最后又小幅度增加的规律,在季节变化上呈现“M”形变化曲线,伸根期较低,旺长期和成熟期相对较高。烟田生态系统 WUE 受到环境因子和栽培管理措施的共同影响,其中环境因子主要是通过蒸散和总初级生产力两者在地区与烟株生育期内的动态差异来间接影响 WUE;而不同地区栽培、施肥、灌溉方式和水平的差异通过改变烟株水碳交换能力及水分有效利用时间增加了 WUE 时空差异的显著性。因此,采用干旱栽培技术并结合科学的灌溉方式降低无效水分损耗是提高干旱、半干旱区烟田 WUE 的重要途径,通过水肥调控烟株耗水过程并结合分根交替灌溉技术改善根系吸水性能是提高水热条件较好的烟区烟田 WUE 的关键手段。

关键词:水分利用效率;环境因子;时空格局;烟田生态系统

中图分类号: S5752.07; S181.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)14-0001-05

在气候变暖的背景下,我国农业区域气候变暖趋势显著,水资源日益紧张,区域性极端天气发生频率上升,农田水分管理形势日益严峻^[1]。水分利用效率(water use efficiency, WUE)被定义为植物光合碳吸收与蒸散的比值,是深入研究生态系统水资源利用水平的重要指标^[2-5]。烟草为重要的经济作物,根据烟株不同生育期需水规律,适宜的水分供应是烟草生长发育顺利进行的前提^[6-7]。然而,受区域环境条件的影响,中国不同生态区烟田水分条件存在显著的时空差异,水分季节分配不均,烟叶生产极易受到水分条件的胁迫而导致烟叶产量和品质不稳定^[8]。北方烟区降水较少,烟株移栽期和伸根期易受干旱胁迫,而成熟期降水量的增加会导致土壤养分再利用,从而引起烟株贪青晚熟。南方烟区年降水较多,水热资源充沛,但时间波动性大,成熟期阶段性干旱会影响烟叶成熟落黄^[9]。在干旱区域,季节降水和年际降水波动较大的地区如何有效地利用有限的水资源,在灌溉水源和降水相对充足的区域如何高效的利用水资源,是烟田 WUE 研究的核心内容^[10]。

鉴于降水、气温、光照等环境因子时空分布不均,有必要从不同角度对我国不同生态区有关烟田 WUE 的研究做一次较为全面的综述。因此,本文针对当前有关烟田 WUE 的研究进展,结合气候变化背景,对烟田 WUE 的时空分布特点及

其影响机制进行了分析,提出了当前烟田 WUE 研究中所存在问题以及提高烟田 WUE 的措施,以期对不同生态区烟田水资源的有效利用提供理论依据。

1 主要烟草种植区气候条件现状

受纬度和经度地带性的影响,我国不同植烟区水热条件存在显著的地域分布差异^[9]。东南部水热条件较好,烟草种植广泛且质量高^[11]。西北部水热条件较差,两者的配合存在很大的缺陷,不利于优质烟叶的生产^[12]。北部、西部烟区地域辽阔,除青藏高原地区温度较低不适宜烟草种植以外,其他区域热量条件较好,但因地理位置的限制,气候干旱,年降水量一般小于 100 mm^[13]。东北部烟区最突出的问题就是热量条件不足,烟草的适宜生育期相对较短,该地区年降水量一般在 400~800 mm,而且降水大多集中在短暂的夏季,东部和北部降水量偏多^[11,13]。黄淮海烟区地理环境复杂,各地热量和降水条件差异很大,其中北部长城沿线地区水热条件较差,积温约为 3 000 ℃,年降水量小于 400 mm。南部地区大多处于暖温带,积温一般大于 4 000 ℃,且降水量季节差异明显,多集中在夏季,一般为 500~800 mm^[14-15]。长江中上游烟区地跨暖温带和亚热带,热量条件相对较好,且水资源充足,年降水量 800~1 500 mm^[16]。与长江中上游烟区相比,长江中下游烟区气候条件更加温和湿润,年积温和降水量都有不同程度的增加,部分区域年降水量可达 2 000 mm^[16-17]。西南烟区地处云贵高原和四川南部高山地带,该区域积温一般大于 4 500 ℃,年降水量在 1 000 mm 左右,而且该地区降水空间分布不均,总体上呈现东多西少的趋势,但雨热同季,对于烟草的生长十分有利,因此该地区也是烟草最适生态区分布最多的区域^[11,14]。南部烟区是我国水热条件最好的区域,积温可达 9 500 ℃,多数地区年降水量在 1 600 mm 以上,但是该地

收稿日期:2017-02-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(编号:41501054);中国农业科学院烟草研究所青年科学基金(编号:2015A02);中国农业科学院科技创新工程(编号:ASTIP-TRIC03)。

作者简介:徐同庆(1993—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事烟田生态系统生产力的研究。E-mail: xutongqing2015@163.com。
通信作者:徐宜民,硕士,研究员,主要研究方向为气候变化对烟田生态系统的影响。E-mail: xuyimin@caas.cn。

区在烤烟种植过程中一方面由于移栽早易受寒潮的影响,另一方面由于烤烟成熟期多处于雨季,日照不足,会严重影响烟叶的质量^[9,17]。综合来看,中国不同生态区烟田气象条件存在显著差异,水热条件时空分布不均,对烟田生态系统生产力水平和水资源利用程度影响较大,烟田生态系统 WUE 的机制研究是解决该问题的重要环节。

2 烟田 WUE 的时空特性

2.1 不同生态区烟田 WUE 特征

通过总结前人对烟田 WUE 的研究结果可以看出,不同生态区烟田 WUE 存在显著的地区差异(表 1)。东部和南部地区是烟田 WUE 的高值区,西部和北部地区是烟田 WUE 的低值区,旱作烟田 WUE 相对较低。对于高纬度、低海拔的东北部烟区来说烟田 WUE 最低,仅 0.39 kg/m³^[18]。黄淮海烟区主要以旱作烟田为主,烟田 WUE 也相对较低,约 0.56 kg/m³^[19-20]。长江中下游、长江中上游烟区跨越温带、北亚热带、中亚热带,烟田 WUE 相对适中,约 0.73 kg/m³^[21-23]。西南部烟区是中国重要的烟草种植区,也是烟田 WUE 地区差异最大的区域,其中贵州高原地区烟田 WUE 与长江中上游地区相似,约 0.64 kg/m³^[24],云南高原地区烟田 WUE 相对较高,约 0.87 kg/m³^[23],滇西山地水热条件均好,但烟田 WUE 较低,仅 0.46 kg/m³^[25]。广西南部 and 广东南部地区是中国南部烟区中重要的部分,该区域烟田 WUE

表 1 不同烟草种植区烟田 WUE

省份	烟草种植区	地形	WUE (kg/m ³)
黑龙江	东北部烟区	平原	0.39
山东	黄淮海烟区	丘陵	0.53
河南	黄淮海烟区	山地丘陵	0.59
江苏	长江中下游烟区	平原	0.69
湖南	长江中下游烟区	山地丘陵	0.87
湖北	长江中上游烟区	山地	0.63
贵州	西南部烟区	高原丘陵	0.64
四川	西南部烟区	山地	0.46
云南	西南部烟区	高原	0.87
广东	南部烟区	丘陵台地	0.84
广西	南部烟区	丘陵平原	0.93

约 0.89 kg/m³,显著高于其他烟区^[26-27]。

2.2 烟田 WUE 的时间动态特征

烟田 WUE 反映了烟株通过气孔与大气进行碳、水交换的状况,而光合与蒸腾作用日变化和季节变化规律是导致烟田 WUE 日变化和季节变化的主要因素^[28]。在日变化上,烟田 WUE 呈现先迅速升高,后降低,最后又小幅度增加的变化规律^[28-29](图 1-a)。在季节变化上,烟田 WUE 呈现“M”形变化曲线(图 1-b),即在移栽后烟田 WUE 缓慢增加,到伸根期烟田 WUE 逐渐下降,进入旺长期烟田 WUE 又逐渐升高,成熟期以后随烟叶的采收 WUE 又开始降低^[30-31]。

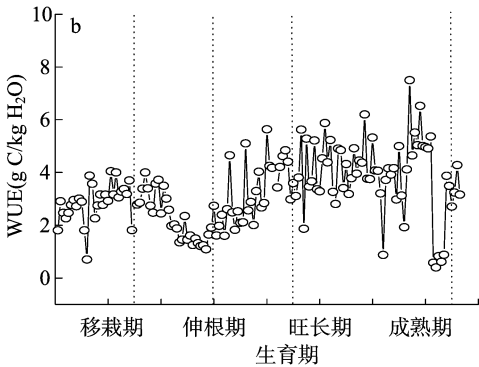
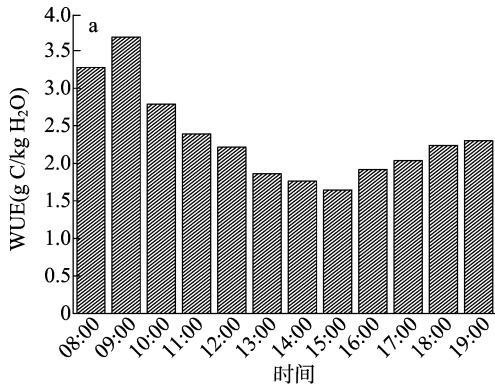


图1 烟田 WUE 日变化(a)及季节变化(b)特征

3 烟田生态系统 WUE 影响机制

3.1 环境因子对 WUE 区域差异的影响

不同烟区所处经度、纬度和海拔的差异对气温、降水、辐射等生态环境因子的影响显著^[11],生态环境因子在不同烟草种植区分布差异是导致烟田 WUE 空间差异的主要原因。我国烟区的水热条件总体呈降水量东多西少而温度南高北低的空间格局^[16]。

东北部烟区受春季回温快、降水集中且干燥多风的影响,烟田土壤和地表径流无效水分蒸发严重,因此 WUE 较低^[9,11]。降水的季节性分配是限制黄淮海烟区烟田 WUE 提高的主要因素,该地区降水少且集中在夏季,生育初期烟田生产力的提高受到水分胁迫的限制,而且烟田蒸腾、蒸发导致失水严重^[9,13]。此外,该地区主要以旱作烟田为主,烟田灌水方式与烟株需水规律的不协调往往导致水资源的浪费,因此该地区烟田 WUE 也相对较低^[19-20]。长江中上游和长江中下游

烟区水热条件良好,大部分地区属于烟草种植适宜区,烟田水分基本能满足烟株生长发育的需要,因此烟田 WUE 适中^[14,22]。滇西山地水热条件均好,但降水量大且集中,地表径流量大,由于日间光照辐射较强,烟田蒸腾、蒸发剧烈,因此 WUE 也较低^[25]。广西南部和广东南部及云贵高原地区年均温和降水量都相对较高,水热资源充沛,对于烟田生态系统生产力的形成具有重要的作用。此外,这些地区地形以丘陵山地和高原为主,昼夜温差较大,不仅有利于光合产物的积累还降低了夜间烟田蒸散量,因此烟田 WUE 相对较高^[14-16,27]。

3.2 环境因子对 WUE 日动态及季节动态的影响

烟田生态系统 WUE 的时间动态变化主要与气温和辐射的日间和季节分布差异呈正相关^[32]。在日变化上,烟株光合作用对气温和辐射反应敏感,因此较强的光合作用和较弱的蒸散耗水是造成烟田 WUE 在上午较高的主要原因^[33]。在中午,烟株光合作用接近光饱和点,同时烟田蒸散随气温和辐射的增强而逐渐增加,成为烟田 WUE 降低的主要因素^[34]。此

外,烟田 WUE 在上午与在下午有明显差异,这主要是受温度和饱和水汽压的影响,引起 WUE 日变化的非对称响应,导致即使在同样的光照强度下,烟田上午 WUE 要大于下午^[35]。

在季节变化上,生长季初,由于气温较低,烟株碳吸收能力较弱,烟田生态系统生产力水平、蒸散和 WUE 都比较低。随着烟株进入旺长阶段,净光合速率和蒸散耗水量都随着气温、降水、辐射和叶面积指数的增加而提高,烟田生产力的增加成为烟田 WUE 提高的主要因素。烟株进入成熟期以后,有效光合面积和地表覆盖度的下降成为 WUE 降低的主要因素^[33,36]。

3.3 栽培措施对 WUE 的影响

3.3.1 种植密度对 WUE 的影响 种植密度是限制烟田水分利用水平的重要因素,合理的种植密度能协调个体与群体的关系,提高中上部烟叶的光合速率和群体冠层指数,降低土壤蒸发,从而提高烟田 WUE^[37]。相对较高的种植密度能够提高烟株中上部叶片对光能的截获能力,从而显著提高群体 WUE^[38]。种植密度与叶面积指数、蒸腾速率及气孔导度等冠层生理生态特性呈正相关,而与烟田光照辐射、气温及叶片净光合速率负相关^[39];在适宜的种植密度范围内,烟田 WUE 与种植密度呈显著正相关,但当密度超过一定阈值以后,群体结构的协调性受到破坏,烟株接收光能情况下降,冠层、棵间空气流通受阻,此时烟田 WUE 也会受到影响而下降^[38-39]。此外种植密度的提高还能增加烟叶总产量,这主要与烟田收获指数的增加有关,而收获指数又与 WUE 呈正相关^[40]。

3.3.2 覆盖集水措施对 WUE 的影响 地膜覆盖是常见的栽培技术模式,烟株移栽后进行地膜覆盖,能够阻止土壤水分向大气中扩散,同时土温的升高使根系代谢活跃,水分吸收能力增强,从而提高 WUE,尤其是对于水资源匮乏的干旱、半干旱烟田来说,地膜覆盖对 WUE 提高的幅度更加明显^[41]。目前单独地从地膜覆盖的角度对烟田 WUE 的研究较少,许多研究将地膜覆盖与其他栽培措施结合起来共同探讨。在传统耕作的基础上,结合垄下深松、施用抗旱肥料、结合地膜覆盖、中耕培土等技术措施比传统栽培方式烟田的 WUE 日均值增加 4.09%^[42]。烟田垄下深耕、深松并结合地膜覆盖技术有利于扩大根系吸水面积,尤其是促进根系对深层土壤有效水分的吸收,提高烟株应对水分胁迫的能力和 WUE^[43]。

3.3.3 抗旱栽培技术对 WUE 的影响 随着对干旱、半干旱区节水抗旱研究的不断深入,烟草抗旱栽培技术也得到了很好的发展^[44]。与传统耕作方式相比,抗旱栽培技术能显著提高烟田 WUE 与叶片蒸腾速率,改善不同生育期水分利用状况^[45]。在抗旱栽培措施下,烟田 WUE 日均值提高 4.09%,这主要是由烟株个体和群体的光合、蒸腾速率以及水碳代谢活跃程度对外界的响应所引起的。但单从光合与蒸腾速率比值的变化来看,抗旱栽培与传统栽培相比,烟田 WUE 日均值变化差异并不显著^[44,46]。总的来看,烟田抗旱栽培技术措施虽然在产量上有显著的突破,但对水资源的综合利用状况却并不理想,仍需进一步制定合理的水分管理工作与与之匹配的栽培措施。

3.4 灌溉对 WUE 的影响

3.4.1 不同生育期灌溉对 WUE 的影响 土壤水分状况也是影响烟田 WUE 的关键因素,当土壤含水量充足时,叶片光

合速率超过与土壤水分的反应限值后就会逐渐下降,而此时蒸腾速率仍在增加,导致烟田 WUE 的下降^[47]。土壤水分主要来源于灌溉水和降水,适宜的降水与灌溉水量分配既满足烟株不同生育期水分需求又不会造成水资源的浪费,从而提高烟田 WUE^[46]。但是,灌溉时期不当不仅会造成水分的损耗还会影响烟株正常生长,例如北方烟区伸根期灌水易导致花叶病发病率增加^[48],还会影响烟株根系的生长^[29,46]。烟田需水量和耗水量在不同生态区存在差异,但其动态规律基本一致^[49]。总体上看,需水量和耗水量前期少,土壤蒸发量大;中期最多,叶片蒸腾占总耗水量的比例最大;后期又趋于减少,蒸发与蒸腾都下降^[42]。对比不同生育期来看,烟株在伸根期、伸根期+旺长期、伸根期+成熟期轻度和中度缺水,烟田耗水量均有所下降,WUE 也均有显著提高^[50]。伸根期及成熟期适度缺水既有利于提高烟田 WUE 又有利于提高烟叶产量和质量,而旺长期缺水虽然提高了 WUE,但可能导致产量的下降。

3.4.2 灌溉方式对 WUE 的影响 灌溉方式会影响灌溉水在土壤中及土壤表面被作物有效利用的时间^[51]。目前的烟田传统灌溉方式,极易增加烟田无效水分损耗,还会破坏土壤理化性质,造成土壤板结和养分流失严重,不利于烟株的生长^[52-53]。此外,传统的大水沟灌会降低烟田 WUE^[54],因此发展新的灌溉技术与模式,有助于提高烟田 WUE。

分根交替灌溉 (APRI) 是根据作物地上水碳交换活动与根系对周围环境的感知之间的双向调节所提出的新的灌溉手段,在水分匮乏地区,APRI 更有利于水资源的利用^[23,55]。APRI 能有效降低烟田土壤蒸发和叶片蒸腾失水,从而显著提高烟田 WUE^[56],此外适当的缩减分根区每次交替灌溉灌水量(约 2/3)能大幅度提高烟田 WUE,但会导致干物质产量的下降^[23]。负压灌溉基于渗透压原理,通过仪器辅助加压,使根际土壤中所损失的水分得到自动补充^[57-58]。烟田负压灌溉不仅能减少水分损耗,还能提高群体 WUE,全生育期节水量可达 22.1%~47.2%^[59-60]。滴灌技术在保证作物正常生长需水的基础上,不仅实现了水肥的同步供应,还使灌溉水与降水相协调,节约了灌溉水^[61]。滴管技术在烟草种植中有多种应用方法,如膜下滴管、地上滴管、加氧滴管等,这些方法的应用在降低烟田耗水量、提高烟田 WUE 方面具有显著效果^[25,62]。

3.5 施肥对烟田 WUE 的影响

正确的施肥量和施肥方式能够有效改善烟株光合碳吸收能力,提高水碳循环速率,从而提高烟田 WUE^[63]。袁颖红等通过长期定位施肥研究指出,长期施肥特别是有机、无机相结合能显著改善红壤种植区土壤的理化性质,提高作物各生育期 WUE^[64]。

关于水肥耦合效应在烟草上的研究主要集中在水-氮和水-钾互作上,氮肥会影响作物 WUE,施氮时期的不同和施肥时土壤水分状况都会影响施肥的效果^[65-67],但是其影响的显著性程度及调控方向又受到不同物种、品种及外界环境的限制^[68-69]。相同的土壤水分条件下,烟田 WUE 会随施氮量的增加而显著提高,这主要与氮肥对烟株光合与蒸腾作用的正向调控有关。当施氮量超过一定限度后,烟株根系吸水能力受到渗透压的胁迫而产生抑制,同时叶片光合碳吸收活动

受到影响, WUE 降低^[70]。钾素能通过渗透调节来提高烟株抗旱能力, 烟田水分亏缺情况下, 适当地施钾有利于叶绿素的合成、改善气孔导度、降低叶片蒸腾, 从而提高烟田 WUE^[71-72]。在一定的浓度范围内, WUE 随施钾量的增加而增大, 当施钾量增大到一定程度时, WUE 增幅变小或者稍有降低^[73]。此外, 微量营养元素对烟株蒸腾、光合和 WUE 也有较大的影响。研究表明, 在施钼量为 0.22、0.35 mg/kg 时, 烟株光合与蒸腾作用最为协调, 烟田 WUE 也较高, 而且在处理 55 d 时烟田 WUE 达到最高, 达 95.64%^[74]。

4 结论与讨论

4.1 不同烟草种植区 WUE 变异特征及影响因素

受环境因子和栽培技术措施的交互影响, 我国不同烟区烟田生态系统 WUE 呈明显的时空差异。在空间分布上, 烟田 WUE 总体呈南方烟区高于北方烟区的格局, 其中广东南部、广西南部 and 云南高原南部烟田是 WUE 高值区, 东北部和黄淮海烟区烟田 WUE 相对较低, 川西南安宁河流域烟田 WUE 也相对较低。环境因子是引起 WUE 空间变化的间接因素; 而气孔导度、光合速率、蒸腾速率及叶面积指数等生物因子是导致 WUE 变化的直接因素; 栽培技术作为重要的人为因素, 不同栽培方式和水平的差异导致烟田 WUE 空间差异更加显著。

从时间动态上看, 烟田生态系统 WUE 具有显著的日变化和季节变化特征, 引起烟田生态系统 WUE 变化的原因与环境因子的时间动态变化有关。在日变化上, 叶片 WUE 随光合速率和蒸散强度的变化而变化, 并表现出非对称响应。在季节变化上, 烟株不同生育期代谢活跃程度和对水分的需求状况是直接影响 WUE 变化的主要因素, 而环境因子在不同生育期的季节分配变异加大了 WUE 季节间差异的显著性。

4.2 不同烟区优化灌溉措施

结合烟区水分特征, 充分利用降水条件, 采用合理的灌溉措施是提高各烟区 WUE 的重要途径。西南烟区烟株生长期降水充足, 但季节分配不均匀, 易导致阶段性干旱, 因此根据 WUE 研究, 依托当地灌溉工程, 对水分进行合理的季节分配, 有利于提升烟叶生产稳定性。黄淮海及东北部烟区降水量偏少, 该区域以旱作烟田为主, 通过膜下灌溉、滴灌等节水灌溉措施, 并根据不同生育期需水规律合理提供灌溉水量是提高 WUE 的重要途径。华南地区烟田降水充足, 完全能满足烟株生育期对水分的需求, 但生育前期由于降水过多易导致涝害, 成熟期空气湿度过大易导致烟叶“高温逼熟”, 因此烟田排涝, 同时结合地膜覆盖、选用水分利用能力高的品种以及通过施肥“以肥促水”对于提高烟田 WUE 具有重要作用。

4.3 烟田 WUE 研究的不足与展望

目前, 对于烟田生态系统 WUE 的研究主要集中在从叶片、冠层、群体等单个尺度进行研究, 缺乏系统性, 尤其是在冠层与环境、群体与环境、生态系统与环境之间复杂的反馈机制方面的研究比较匮乏。而且相关试验简单地与某一种影响因子相联系, 不能够系统地分析 WUE 的时空变异特征及其驱动机制。从数据的获取上看, 烟田 WUE 的测定主要采用收获法和红外气体分析法, 测量及计算结果与实际值之间存

在很大的误差。通过光合与蒸腾之间的耦合关系所建立的一系列数学模型, 其适应性也非常有限, 模拟效果在特定的条件以外并不理想。结合遥感技术和地面实际观测数据, 利用模型模拟 WUE 是今后研究的主要方向。利用观测数据进行模型参数化及结果验证, 可以实现对区域 WUE 的空间模拟。但在实际的研究当中, 由于水、碳耦合过程的复杂性, 一些机制尚未得到有效的解释, 从而导致一些模型模拟结果具有一定的不确定性。因此, 一个准确、全面的烟田 WUE 估算模型是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014 synthesis report [J]. Environmental Policy Collection, 2014, 27 (2): 408.
- [2] Singh P K, Mishra A K, Imtiyaz M. Moisture stress and the water use efficiency of mustard [J]. Agriculture Water Management, 1991, 20 (3): 245 - 253.
- [3] Niu S L, Xing X R, Zhang Z, et al. Water use efficiency in response to climate change - from leaf to ecosystem in a temperate steppe [J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1073 - 1082.
- [4] Donovan L A, Ehleringer J R. Ecophysiological differences among juvenile and reproductive plants of several woody species [J]. Oecologia, 1991, 86(4): 594 - 597.
- [5] Baldocchi D. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C₃ (wheat) and an open C₄ (corn) crop. 2. CO₂ exchange and water use efficiency [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 67(3/4): 291 - 321.
- [6] 何健. 河南中壤烟区烤烟需水指标与需水模型研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2004.
- [7] 金文华, 刘金海, 鲁家鑫, 等. 烤烟节水灌溉试验与示范[J]. 烟草科技, 2002(11): 39 - 41.
- [8] 陈瑞泰, 唐远驹. 中国烟草种植区划[C]//中国农作物种植区划论文集. 北京: 科学出版社, 1987: 175 - 192.
- [9] 中国农业科学院烟草研究所. 中国烟草栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005: 113 - 122.
- [10] 韩富根, 刘学芝, 汪耀富, 等. 抗旱栽培综合技术对烤烟光合特性和水分利用效率的影响[J]. 河南农业大学学报, 2003, 37 (4): 352 - 356.
- [11] 段淑辉. 我国不同生态类型烟田蒸散量特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [12] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152 - 64.
- [13] 曲迎乐, 高晓清, 陈文, 等. 近 50 年来我国东、西部地面气温和降水变化对比的初步分析[J]. 高原气象, 2008, 27(3): 524 - 529.
- [14] 邓可洪, 居辉, 熊伟, 等. 气候变化对中国农业的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2006, 22(5): 439 - 41.
- [15] 王馥棠. 近十年来我国气候变暖影响研究的若干进展[J]. 应用气象学报, 2002, 13(6): 755 - 66.
- [16] 宁晓菊, 秦耀辰, 崔耀平, 等. 60 年来中国农业水热气候条件的时空变化[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 364 - 79.
- [17] 邴飞龙, 苏红波, 邵全琴, 等. 近 30 年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(1): 1 - 13.

- [18] 贺国强, 李恒全, 刘德育, 等. 种植密度对烤烟叶片光合作用和产质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2012, 6(5): 31–35.
- [19] 杨德廉, 李祥英, 赵文超, 等. 有机肥施用对烟草光合特性的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(28): 47–51.
- [20] 汪耀富, 董金川, 刘国顺, 等. 烟草移栽期与烟田土壤水分利用关系的研究[J]. 河南农业大学学报, 1998, 15(11): 15–20.
- [21] 高华军. 烤烟节水灌溉制度与优化灌溉指标研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [22] 谈晶晶, 邵孝侯, 陈立华, 等. 不同供水条件下烟田的水分利用效率[J]. 河海大学学报, 2012, 40(4): 446–450.
- [23] 蔡寒玉, 汪耀富, 李进平, 等. 烤烟控制性分根交替灌水的生理基础研究[J]. 节水灌溉, 2006(2): 11–15.
- [24] 焦雪梅, 钱晓刚, 廖 勇. 水氮耦合效应对贵州烟田土壤水分的影响[J]. 山地农业生物学报, 2007, 26(3): 207–210.
- [25] 康小平, 樊 毅, 王君勤, 等. 不同灌溉方式下水分调控对烤烟品质和产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(12): 4–8.
- [26] 何东华, 谢裕华, 张建标, 等. 保水型肥料对旱地烟田和烟叶产量的影响研究[J]. 广东农业科学, 2004, 5(22): 52–54.
- [27] 莫江华, 李伏生, 李桂湘, 等. 不同生育期湿度缺水对烤烟生长、水分利用和氮钾含量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1071–1076.
- [28] 孙国荣, 阎秀峰, 刘 波, 等. 烤烟旺长期气孔和非气孔限制对水分胁迫的反应[J]. 植物研究, 2002, 22(2): 179–183.
- [29] 蔡寒玉, 汪耀富, 李进平. 土壤水分对烤烟形态和耗水特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(1): 38–41.
- [30] 孙梅霞, 汪耀富, 张全民, 等. 烟草生理指标与土壤含水量的关系[J]. 中国烟草科学, 2000(2): 30–33.
- [31] 阿吉艾克拜尔. 调亏灌溉对烟草生长发育及产量品质的影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [32] 王树键, 王 瑞, 申国明, 等. 湖北恩施烤烟平顶期烟田碳通量日变化研究[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(6): 43–48.
- [33] 戴衍晨, 王 瑞, 张继光, 等. 恩施烟区烟田生态系统 CO₂ 通量变化特征分析[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(4): 63–69.
- [34] 战 领, 杨汉波, 雷慧闽. 基于通量观测数据的玉米水碳交换量及水分利用效率分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊1): 88–93.
- [35] Tang X G, Ding Z, Li H P, et al. Characterizing ecosystem water use efficiency of croplands with eddy covariance measurements and MODIS products[J]. Ecological Engineering, 2015, 85: 212–217.
- [36] 邱慧慧, 史宏志, 王太运. 微喷条件下灌水量对烤烟生长发育和水分利用效率的影响[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 17–24.
- [37] 韩锦峰, 岑天镇, 郭月清. 烤烟种植密度和留叶数对农艺性状及烟叶化学成分效应的初步研究[J]. 中国烟草, 1984(2): 4–9.
- [38] 金海保. 浅谈烤烟种植密度、单株留叶数与烟叶等级结构[J]. 中国烟草, 1986(1): 36–38.
- [39] 金海保, 洗铁深, 庄传志, 等. 不同密度、留叶数与烟叶质量的关系[J]. 中国烟草, 1987(1): 34–36.
- [40] 董宝娣. 不同类型冬小麦高效用水生理生态特性研究[D]. 北京: 中国科学院遗传与发育生物学研究所, 2008.
- [41] 王丽萍, 汪耀富, 王伯武, 等. 覆盖集水措施对烟田土壤水分时空分布和利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 119–121.
- [42] 刘国顺, 符云鹏, 高致明, 等. 豫西雨养烟区烤烟生长发育规律研究[J]. 河南农业大学学报, 1998(增刊1): 2–9.
- [43] 王 钝, 程 功, 汪耀富, 等. 不同耕作方式对烟田土壤水分动态及利用效率的影响[J]. 河南农业大学学报, 1998(增刊1): 107–112.
- [44] 杨树申, 王运新, 王世林. 卢氏烤烟旱作栽培技术[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1995.
- [45] 李宙文, 宋瑞芳, 王 芳, 等. 不同水分处理对湘西烟草叶片解剖结构的影响[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(22): 29–31.
- [46] 李进平, 陈振国, 杨艳华, 等. 水分条件对烤烟生理指标的影响及适宜土壤水分指标研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(1): 93–96.
- [47] 陈佳勃, 钱晓刚, 李许滨, 等. 烟田土壤水分动态变化特征[J]. 贵州农业科学, 2006, 34(4): 44–46.
- [48] 韩锦峰, 汪耀富, 钱晓刚, 等. 烟草栽培生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 1–22.
- [49] 汪耀富, 高华军, 邵孝侯. 蒸渗仪控制下烤烟土壤水分的时空动态研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 152–155.
- [50] 莫江华. 不同时期水分亏缺对烤烟产质量和水分养分利用效率的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [51] 彭 静, 郭 磊, 彭 琼, 等. 不同灌溉方式对烤烟的生长及品质的影响[J]. 植物生理学报, 2013, 49(1): 53–56.
- [52] 汪耀富, 蔡寒玉, 张晓海, 等. 我国烟草优化灌溉技术发展的策略与措施[J]. 中国烟草科学, 2007, 28(1): 6–9.
- [53] 谷秋荣, 杨占平, 王秋杰, 等. 不同灌水量对土壤氮磷钾养分移动的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 13–17.
- [54] 武德里, 封洁琼, 彭 静, 等. 不同灌溉方式对烤烟产量和化学品质及水分利用率的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2013(4): 20–24.
- [55] 康绍忠, 蔡焕杰. 控制性根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 3–13.
- [56] 刘永贤. 烤烟时空水肥耦合效应研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [57] Livingston B E. A method for controlling plant moisture[J]. Plant World, 1908, 11: 39–40.
- [58] Richards L A, Loomis W E. Limitation of auto-irrigations for controlling soil moisture under growing plant[J]. Plant Physiology, 1942, 17(2): 223–235.
- [59] Kato Z, Tejima S. Theory and fundamental studies on subsurface irrigation method by use of negative pressure; experimental studies on the subsurface irrigation method (I)[J]. Transactions of the Japanese Society of Irrigation Drainage & Reclamation Engineering, 1982(101): 46–54.
- [60] 肖海强, 刘学勇, 龙怀玉, 等. 土壤水势对烤烟生长及其耗水特性的影响[J]. 中国烟草科学, 2015(1): 35–41.
- [61] 丁福章, 孔德钧, 袁有波, 等. 干旱条件下不同滴灌量对烤烟生长和产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(11): 71–73.
- [62] 张文萍, 姚帮松, 肖卫华, 等. 增氧滴灌对烟草根系发育状况的影响研究[J]. 现代农业科技, 2012(23): 9–11.
- [63] 向鹏华. 水肥运筹下烤烟生物效应的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
- [64] 袁颖红, 樊后保, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻光合特性及水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2239–2244.
- [65] Heitholt J J. Water use efficiency and dry matter distribution in nitrogen- and water- stressed winter wheat[J]. Agronomy Journal, 1989, 81(3): 464–469.

- 333 – 336.
- [55] Kawakami Y, Shin D H, Kitano T, et al. Transactivation activity of thyroid hormone receptors in fish (*Conger myriaster*) in response to thyroid hormones[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B Biochemistry and Molecular Biology, 2006, 144(4): 503 – 509.
- [56] Li W, Zha J M, Spear P A, et al. Changes of thyroid hormone levels and related gene expression in Chinese rare minnow (*Gobiocypris rarus*) during 3 – amino – 1, 2, 4 – triazole exposure and recovery [J]. Aquatic Toxicology, 2009, 92(1): 50 – 57.
- [57] Morgado I, Hamers T, van der Ven L, et al. Disruption of thyroid hormone binding to sea bream recombinant transthyretin by ioxinyl and polybrominated diphenyl ethers [J]. Chemosphere, 2007, 69(1): 155 – 163.
- [58] Walpita C N, Crawford A D, Darras V M. Combined antisense knockdown of type 1 and type 2 iodothyronine deiodinases disrupts embryonic development in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. General and Comparative Endocrinology, 2010, 166(1): 134 – 141.
- [59] Orozco A, Valverde R C. Thyroid hormone deiodination in fish[J]. Thyroid: Official Journal of the American Thyroid Association, 2005, 15(8): 799 – 813.
- [60] van der Geyten S, Byamungu N, Reyns G E, et al. Lodothyronine deiodinases and the control of plasma and tissue thyroid hormone levels in hyperthyroid tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Journal of Endocrinology, 2005, 184(3): 467 – 479.
- [61] Coimbra A M, Reis – Henriques M A, Darras V M. Circulating thyroid hormone levels and iodothyronine deiodinase activities in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) following dietary exposure to endosulfan and arochlor 1254 [J]. Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol, 2005, 141(1): 8 – 14.
- [62] Wei Y, Liu Y, Wang J, et al. Toxicogenomic analysis of the hepatic effects of perfluorooctanoic acid on rare minnows (*Gobiocypris rarus*) [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2008, 226(3): 285 – 297.
- [63] Jugan M L, Levi Y, Blondeau J P. Endocrine disruptors and thyroid hormone physiology [J]. Biochemical Pharmacology, 2010, 79(7): 939 – 947.
- [64] Brown S B, Evans R E, Vandenbyllardt L, et al. Altered thyroid status in lake trout (*Salvelinus namaycush*) exposed to co – planar 3, 3', 4, 4', 5 – pentachlorobiphenyl [J]. Aquatic Toxicology, 2004, 67(1): 75 – 85.
- [65] 瞿璟琰, 施华宏, 刘青坡, 等. 污染物对鱼类的甲状腺激素干扰效应及其作用机制[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(4): 375 – 380.
- [66] Tabb M M, Blumberg B. New modes of action for endocrine – disrupting chemicals [J]. Molecular Endocrinology, 2006, 20(3): 475 – 482.
- [67] 张臻宇, 鲍宝龙. 鱼类早期发育阶段甲状腺激素的作用[J]. 上海海洋大学学报, 1999, 8(1): 68 – 75.
- [68] Brown C L, Kim B G. Combined application of cortisol and triiodothyronine in the culture of larval marine finfish [J]. Aquaculture, 1995, 135(1/2/3): 79 – 86.
- [69] Schmidt F, Schnurr S, Wolf R, et al. Effects of the anti – thyroidal compound potassium – perchlorate on the thyroid system of the zebrafish [J]. Aquatic Toxicology, 2012, 109(3): 47 – 58.
- [70] Huang L Y, Schreiber A M, Soffientino B, et al. Metamorphosis of summer flounder (*Paralichthys dentatus*): thyroid status and the timing of gastric gland formation [J]. Journal of Experimental Zoology, 1998, 280(6): 413 – 420.
- [71] 张晓娜, 田 华, 汝少国. 鱼类甲状腺轴对胚胎发育、仔鱼变态及性别分化的调控作用研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(增刊 1): 94 – 101.
- [72] Croteau M C, Davidson M, Duarte – Guterman P, et al. Assessment of thyroid system disruption in rana pipiens tadpoles chronically exposed to UVB radiation and 4 – tert – octylphenol [J]. Aquatic Toxicology, 2009, 95(2): 81 – 92.
- [73] Balch G C, Vêlez – Espino L A, Sweet C, et al. Inhibition of metamorphosis in tadpoles of *Xenopus laevis* exposed to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) [J]. Chemosphere, 2006, 64(2): 328 – 338. .
- [74] Cyr D G, Eales J G. Effects of short – term 17 beta – estradiol treatment on the properties of T₄ – binding proteins in the plasma of immature rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. Journal of Experimental Zoology, 1992, 262(4): 414 – 419.
- [75] Peter M, Wendelaar S E. Ionoregulatory and interrenal responses in hyper – and hypothyroid tilapia (*Oreochromis mossambicus*) to thyroid hormones [J]. Comparative Biochemistry and Physiology (Part A, Molecular & Integrative Physiology), 2006, 143(4): 56 – 57.
- [76] Delgado J B O, Ruane N M, Pousão – Ferreira P, et al. Thyroid gland development in Senegalese sole (*Solea senegalensis* Kaup 1858) during early life stages: a histochemical and immunohistochemical approach [J]. Aquaculture, 2006, 260(1/2/3/4): 346 – 356.
- (上接第 5 页)
- [66] Laghetti G, Piergiovanni A R, Perrino P. Yield and oil quality in selected lines of *Crambe abyssinica* Hochst. ex R. E. Fries and *C. hispanica* L. grown in Italy [J]. Industrial Crops & Products, 1995, 4(3): 203 – 212.
- [67] Bruck H, Jureit C, Hermann M, et al. Effects of water and nitrogen supply on water use efficiency and carbon isotope discrimination in edible canna (*Canna edulis* Ker – Gawler) [J]. Plant Biology, 2001, 3(4): 326 – 334.
- [68] Guehl J M, Fort C, Ferhi A. Differential response of leaf conductance, carbon isotope discrimination and water – use efficiency to nitrogen deficiency in maritime pine and pedunculate oak plants [J]. New Phytologist, 1995, 131(2): 149 – 157.
- [69] 石玫莉, 李伏生, 韦建玉, 等. 不同氮水平下根区局部灌溉对烤烟产量、水分利用与氮钾含量的影响[J]. 广西农业生物科学, 2008, 27(2): 142 – 147.
- [70] 周柳强, 黄美福, 周兴华, 等. 不同氮肥用量对田烤烟生长、养分吸收及产质量的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(4): 1166 – 1172.
- [71] 王同朝, 刘作新, 高致明, 等. 分期追施钾肥对烤烟生长和品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(4): 348 – 351.
- [72] 谢会雅. 水肥耦合对烤烟养分吸收及烟叶产量和品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
- [73] 宋世旭. 水钾耦合对烤烟抗旱特性及土壤水钾变化和烟叶产量品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [74] 陈永安, 武 丽, 李余湘, 等. 钼营养对烤烟光合色素、光合特性和水分利用率的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(3): 421 – 425.