

网络出版时间:2016-04-07 09:00
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160407.0900.014.html>

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.05.007

不同灌溉方式对烟草生长、产量与水分利用效率的影响

樊 毅¹,王君勤¹,崔宁博²,张宽地³,康小平^{1,2},周 芸¹

(1 四川省水利科学研究院,四川 成都 610072;2 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院,四川 成都 610065;3 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】确定烟草节水灌溉适宜的推广模式,促进烟草生产节水增产和提质增效。【方法】根据烟草需水特性设置了沟灌、穴灌和滴灌(即 G、X、D)3 种灌水方式及低、中、高(即 L、M、H)3 个灌水水平与对照(雨养,即 CK)共 10 个处理,每个处理 3 次重复,研究不同灌水处理对烟草生长、光合特性、产量及水分利用效率的影响。【结果】滴灌、穴灌和沟灌各处理的烟草株高、茎围和单叶面积均明显优于 CK,且以 DM、DH 处理最优,差异达极显著水平($P<0.01$);滴灌、穴灌在显著提高烟草叶片净光合速率(P_n)的同时降低了蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s),使叶片羧化速率(CE)与瞬时水分利用效率(WUE_i)显著提高,以 DM、XH 处理效果最明显;不同灌水处理中,XH 处理与 GM、GH 处理产量无显著差异($P>0.05$),但 XH 处理水分利用效率(WUE_y)极显著高于 GM 和 GH 处理($P<0.01$);DM 和 XH 处理的烟叶产量、上等烟叶比例、 WUE_y 较为理想,分别为 2 628.47 kg/hm²、63.5%、5.69 kg/(hm²·mm)和 2 389.85 kg/hm²、62.1%、5.03 kg/(hm²·mm)。【结论】以实现烟草生产节水高产增效为目的,DM(滴灌中水)处理(灌水定额 4.8 mm、全生育灌水 6 次、灌溉定额 28.8 mm)和 XH(穴灌高水)处理(灌水定额 3.2 mm、全生育灌水 6 次、灌溉定额 19.2 mm)均是较适宜的推广模式,后者更适合在经济条件较差的干旱缺水地区推广。

[关键词] 烟草;灌溉方式;光合特性;水分利用效率

[中图分类号] S275;S572 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2016)05-0045-10

Effects of different irrigation methods on physiological characteristics, yield and water use efficiency of flue-cured tobacco

FAN Yi¹,WANG Jun-qin¹,CUI Ning-bo²,ZHANG Kuan-di³,
KANG Xiao-ping^{1,2},ZHOU Yun¹

(1 Sichuan Provincial Water Conservancy Research Institute,Chengdu,Sichuan 610072,China;
2 College of Water Resource & Hydropower,Sichuan University,Chengdu,Sichuan 610065,China;
3 College of Water Resources and Architectural Engineering,Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi 712100,China)

Abstract: 【Objective】Effects of different irrigation methods on tobacco growth,photosynthetic characteristics,yield and water use efficiency (WUE) were studied to find suitable extension pattern for saving water and increasing yield and quality.【Method】According to tobacco water-requiring characteristics and precipitation during crop growth stage,10 irrigation treatments including three irrigation methods (furrow irrigation G,hole irrigation X,and drip irrigation D) by three levels (low L,medium M,and high H) and one control (no irrigation,CK) were conducted. Each treatment was irrigated for 3 times. Then,the effects

[收稿日期] 2014-09-19
[基金项目] 水利部公益性行业科研专项(201101039);国家自然科学基金项目(51009101);2014 年四川省省级财政专项;2015 年省级公益性科研院所基本科研业务费项目(2060302-210)
[作者简介] 樊 毅(1982—),男,四川简阳人,工程师,硕士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:scskyfy@126.com
[通信作者] 崔宁博(1981—),男,陕西凤翔人,副教授,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:cuingbo@126.com

on growth, photosynthetic characteristics, yield and WUE were analyzed. 【Result】 Drip irrigation, hole irrigation and furrow irrigation had significant effect on tobacco plant height, stem circumference and LA. Especially, drip irrigation with medium level (DM) and high level (DH) had significant difference ($P < 0.01$) compared to CK. Drip irrigation and hole irrigation significantly increased tobacco photosynthetic rate (P_n), while reduced transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s), which significantly increased leaf carboxylation rate (CE) and instantaneous water use efficiency (WUE_i) with the best effects in hole irrigation with high level (XH) and drip irrigation with medium level (DM). Under different irrigation treatments, hole irrigation with high level (XH), and furrow irrigation with medium level (GM) and high level (GH) had no significant effects ($P > 0.05$) on yield, but XH had extremely significant higher water use efficiency (WUE_y) than GM and GH ($P < 0.01$). DM and XH treatments obtained ideal yields (2 628.47 and 2 389.85 kg/hm²), ratios of high quality leaves (63.5% and 62.1%) and WUE_y (5.69 and 5.03 kg/(hm² · mm)). 【Conclusion】 DM treatment (irrigation quota 4.8 mm each time, 6 times, and total irrigation quota 28.8 mm) and XH treatment (irrigation quota 3.2 mm each time, 6 times, and total irrigation quota 19.2 mm) were suitable for wide application, especially XH was good for water scarce areas with poor economic condition.

Key words: flue-cured tobacco; irrigation methods; photosynthetic; water use efficiency

烤烟是中国、印度、巴西等国家的重要经济作物^[1]。中国是世界第一烟叶生产大国,目前烟叶产量约占世界总产量的 41.5%,2012 年全国种植烤烟 141.2 万 hm²,产量达 273.7 万 t,约占世界烤烟总产量的 59.9%^[2]。目前,我国烤烟生产集中在云南、贵州、四川、河南、重庆等地的贫困山区,而且已经成为当地农民脱贫的重要途径。然而这些区域在烟草主要生长期由于降雨量不足或分布不均匀,不能满足烟草全生育期需水,烟草生育期内阶段性季节性干旱时有发生,严重影响烟叶的产量和品质,因此适时适量地补充灌溉是烟草生产的重要环节。当前我国烟草灌溉主要采取大水漫灌的方式,不仅造成水资源的严重浪费与土壤养分大量淋失,还使土壤理化性状受到破坏^[3]。有关不同灌溉方式控水处理对烟草生长、光合特性、产量与水分利用效率的影响已有部分报道。刘永贤等^[4]发现,水分调控处理能有效调节烟叶气孔开度,降低气孔导度和蒸腾速率,减少蒸腾耗水和灌水量,有效提高水分利用效率(WUE)。刘国顺等^[5]研究发现,沟灌、滴灌处理的烟草在旺长期的光合能力最强,其中沟灌的蒸腾速率高于其他处理,但沟灌不仅造成水资源浪费,破坏土壤理化性质,还导致土壤养分大量流失,对烤烟的生长也造成不利影响。周宽余等^[6]研究发现,合理控水穴灌有利于水分的吸收和利用,可以促进烟株正常生长发育,对改善烟叶香气、吃味及降低刺激性有一定作用,缺点是费工费时。Bilalis 等^[7]认为,滴灌用水量较小,水分利用效率及烟草产量高于喷

灌,而且滴灌时水分能少量缓慢地分配到烟草根区土壤,使根区土壤含水率更为均匀,同时灌溉系统的选择对于提高灌溉水利用效率也具有重要作用。Cakir 等^[8]认为,不同灌溉制度下不同生育期的水分胁迫会影响弗吉尼亚烟草的成熟期,适宜的土壤含水率可明显降低危害人体健康的烟叶尼古丁与氮含量。Ruiz 等^[9]发现,在充分灌溉条件下烟叶中尼古丁含量为 0.85%~1.14%,Bilalis 等^[7]发现,滴灌或喷灌可使烟叶尼古丁含量降低到 0.6%~0.9%。但有关不同节水灌溉方式下烟草生长需水特性对烟草不同生育期水分调控影响的研究还少见报道。因此,本试验在不同节水灌溉条件下,对烟草不同生育时期进行控制水量灌溉,探讨不同灌水处理对烟草的生长、生理特性、产量与水分利用效率的影响,以期寻找不同灌溉方式下烟草节水高效灌溉方式,为实施烟田水分精量供给提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013 年 4—8 月在四川省凉山州冕宁县回龙乡石古烟草种植基地(N28°29',E102°07')进行。试验区海拔 1 800 m,多年平均降雨量 1 150 mm,无霜期 275 d,平均气温 14.5℃,日照时数 2 035 h,试验期间降水量为 480.6 mm,具体分布详见表 1。试验地土壤为红黄壤土,土壤 pH 值为 5.54,速效氮 83 mg/kg,速效磷 36.5 mg/kg,速效钾 176 mg/kg,田间持水量 21.56%,土壤体积质量

1.41 g/cm³。

表 1 烟草试验期间降水量

Table 1 Effective rainfalls during the study period				mm
月份 Month	上旬 Early	中旬 Mid	下旬 Late	合计 Total
4 月 April	—	—	6.6	6.6
5 月 May	30.6	7.4	5.8	43.8
6 月 June	10.7	13.9	66.2	90.8
7 月 July	101.0	65.4	14.5	180.9
8 月 August	67.0	59.0	32.5	158.5

注:烟草各生育期降水量分别为伸根期 41.3 mm,旺长期 118.8 mm,成熟期 320.5 mm,合计 480.6 mm。
Note: Rainfall at each stage: root spreading stage 41.3 mm, vigorous growing stage 118.8 mm and maturing stage 320.5 mm, and total 480.6 mm.

1.2 试验设计与处理

试验供试烟草品种为云烟 87,于 2013 年 2 月上旬进行漂浮育苗,04-27 移栽,还苗期后生育阶段可具体划分为:伸根期(05-04—06-01)、旺长期(06-02—07-05)和成熟期(07-05—08-30)。试验全生育期设置沟灌、穴灌和滴灌 3 种灌水方式,每种灌溉方式设低(L)、中(M)、高(H)3 个灌水处理,另设一个对照处理(雨养,CK),每处理设 3 个重复,采用单因素随机区组设计。小区面积为 30 m×4.5 m(长×宽),行株距为 1.2 m×0.55 m,各小区间以塑料薄膜相互隔离,隔离深度为 60 cm,以防止水分和养分互相渗透。移栽后至还苗期所有处理灌水均控制在田间持水量的 80%~90%,伸根期、旺长期及成熟期各灌溉处理分别按田间持水量(土壤含水量)的

55%,70%和 60%为下限进行灌溉,使用 TDR 水分监测仪(AZS-100,德国)随时监测土壤水分含量,当土壤水分低于下限时开始灌水,灌溉水量以伸根期土壤含水量≤75%,旺长期≤85%和成熟期≤80%为准,分低(L)、中(M)和高(H)3 个灌水水平进行。不同灌溉方式下烟草各生育期灌水量见表 2。

试验地施肥参照当地优质烤烟施肥标准,移栽时一次性施用烟草专用复合肥 375 kg/hm²,发酵油枯 300 kg/hm² 和普钙 375 kg/hm²,全部用作基肥,移栽 10~15 d 后统一追施钾肥(硝酸钾含 K₂O₄ 5%)225 kg/hm² 和烟草专用复合肥 75 kg/hm²,移栽后 30 d 施用烟草专用复合肥 225 kg/hm² 和钾肥 225 kg/hm²。烟田管理除灌水外其他农艺措施均按优质烟管理规范进行。

表 2 不同灌溉方式下烟草各生育期灌水量

Table 2 Irrigation amounts of different irrigation methods during growth period of flue-cured tobacco								
灌水处理 Irrigation treatment	伸根期 Root spreading stage		旺长期 Vigorous growing stage		成熟期 Maturing stage		全生育期 Whole growth stage	
	灌溉水量/mm Irrigation amount	次数 Frequency	灌溉水量/mm Irrigation amount	次数 Frequency	灌溉水量/mm Irrigation amount	次数 Frequency	灌溉水量/mm Irrigation amount	次数 Frequency
GL	14.4	2	21.6	3	7.2	1	43.2	6
GM	19.0	2	28.5	3	9.5	1	57.0	6
GH	23.0	2	34.5	3	11.5	1	69.0	6
XL	3.2	2	4.8	3	1.6	1	9.6	6
XM	4.8	2	7.2	3	2.4	1	14.4	6
XH	6.4	2	9.6	3	3.2	1	19.2	6
DL	6.8	2	10.2	3	3.4	1	20.4	6
DM	9.6	2	14.4	3	4.8	1	28.8	6
DH	12.0	2	18.0	3	6.0	1	36.0	6

注:GL、GM 和 GH 分别代表沟灌低水、中水和高水处理;XL、XM 和 XH 分别代表穴灌低水、中水和高水处理;DL、DM 和 DH 分别代表滴灌低水、中水和高水处理。下表同。
Note: GL, GM and GH represent furrow irrigation with low, media and high water levels; XL, XM and XH represent hole irrigation with low, media and high water levels; DL, DM and DH represent drip irrigation with low, media and high water levels. The same below.

1.3 测定项目及方法

烟草农艺性状测定:每小区选取长势均一的 5 个植株挂牌定位观察,分别在旺长期和成熟期测定株高、茎围、最大叶长、最大叶宽和有效叶片数等农

艺性状,同时通过公式 $LA=0.6345\times(\text{最大叶长}\times\text{最大叶宽})$ 计算单叶面积(LA)指标。
烟叶光合参数测定:采用 LCPro+全自动便携式光合仪在烟草旺长中期(移栽后 50 d)选晴朗天气

09:00—11:00 测定,测定指标为烟叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等;羧化速率 $CE=P_n/C_i$,单叶瞬时水分利用效率(WUE_i)由 $WUE_i=P_n/T_r$ 计算确定。

烟草产品灌溉质量(效益)确定:所有处理的成熟烟叶按小区分别采收和烘烤,并统计烤后烟叶产量,各项处理均按国家标准分级,确定上等、中等烟叶比例;作物耗水量采用水量平衡法计算;烟叶水分利用效率(WUE_y)由烟叶产量 Y (干质量)与耗水量 ET_C 的比值确定,即 $WUE_y=Y/ET_C$ 。

1.4 数据处理

试验数据表示为“平均值±标准误”。采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS14.50 统计软件进行试验数据处理和统计分析,并用 Duncan 法进行样本间多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式对烟草农艺性状的影响

由于各处理在伸根期对农艺性状的影响相对有限,结果差别较小,因此只对旺长期和成熟期的数据进行分析说明。

2.1.1 株 高 从表 3 可以看出,烟草旺长期,除 XL 和 XM 处理外其他不同灌溉方式处理的株高均

显著高于 CK($P<0.05$),其中 GH 处理最大,达 43.10 cm,较 CK 提高 75.9%;同一灌溉方式下各处理株高相比,沟灌以 GH 处理最大,GL 与 GH 处理间差异显著($P<0.05$),穴灌和滴灌分别以 XH、DH 处理最大,但各处理间差异不显著($P>0.05$);不同灌溉方式之间,以沟灌处理的株高均值最大,滴灌次之,穴灌最小。烟草成熟期,与 CK 相比,不同灌溉方式处理的株高均显著高于 CK($P<0.05$),其中 DH 处理株高最大,达到 136.68 cm,较 CK 提高 94.1%;同一灌溉方式下,沟灌、滴灌各处理间差异显著($P<0.05$),GH 处理的最大值为 96.16 cm, DH 处理的最大值为 136.68 cm;穴灌 XH 和 XM 处理间差异不显著($P>0.05$);不同灌溉方式之间,滴灌对株高的影响最明显,均值达 122.61 cm,穴灌次之,沟灌最小。由旺长期到成熟期,对株高影响最为显著的灌溉方式由沟灌变化为滴灌,且达到了极显著水平($P<0.01$),对株高影响最小的灌溉方式则由穴灌变化为沟灌;同时,旺长期各灌溉方式间的株高均值差异相对较小,为 8.51 cm;成熟期各灌溉方式间的株高均值差异明显,达到 38.37 cm,这表明从旺长期至成熟期进行合理的灌水处理能明显提高烟草株高指标。

表 3 不同灌溉方式对烟草农艺性状的影响

Table 3 Effects of different irrigation methods on agronomy characteristics of tobacco

灌水处理 Irrigation treatments	旺长期(移栽后 38 d) Vigorous growing stage(38 days after transplanting)				成熟期(移栽后 82 d) Maturing stage (82 days after transplanting)			
	株高/cm Plant height	茎围/cm Stem diameter	有效叶 片数 Effective leaves	单叶面积/m ² Single leaf area	株高/cm Plant height	茎围/cm Stem diameter	有效叶 片数 Effective leaves	单叶面积/m ² Single leaf area
GL	31.39±2.10 bcd	5.50±0.20 cd	11	0.092±0.003 def	75.43±0.69 f	7.66±0.09 f	22	0.171±0.002 f
GM	36.25±2.43 abc	6.35±0.24 abc	12	0.106±0.004 bcd	81.14±0.74 e	7.96±0.10 def	21	0.194±0.002 d
GH	43.10±2.89 a	7.55±0.28 a	12	0.126±0.005 ab	96.16±0.88 d	8.31±0.08 cde	22	0.180±0.002 ef
平均 Average	36.91	6.47	11.7	0.110	84.24	7.98	21.7	0.180
XL	23.60±0.57 e	4.74±0.07 de	10	0.082±0.002 ef	85.30±0.80 e	7.91±0.08 ef	21	0.176±0.002 ef
XM	27.25±0.66 de	5.48±0.08 cd	11	0.095±0.002 de	93.00±0.87 d	8.41±0.08 cd	21	0.208±0.002 c
XH	34.34±0.83 abcd	6.90±0.10 ab	12	0.119±0.002 abc	94.77±0.88 d	9.11±0.01 abA	22	0.205±0.002 c
平均 Average	28.40	5.71	11	0.100	91.02	8.48	21.3	0.200
DL	31.70±1.61 bcd	5.47±0.23 cd	12	0.099±0.004 cde	106.53±0.81 cAB	8.21±0.07 de	23	0.182±0.002 e
DM	35.50±1.80 abc	6.13±0.26 bc	11	0.111±0.004 abcd	124.62±0.95 bA	8.71±0.07 bcAB	21	0.250±0.002 bA
DH	42.21±2.14 ab	7.28±0.31 ab	12	0.132±0.005 a	136.68±1.04 aA	9.22±0.08 aA	22	0.275±0.003 aA
平均 Average	36.47	6.29	11.7	0.110	122.61	8.71	22	0.240
CK	24.50±0.32 e	4.15±0.03 e	11	0.072±0.002 f	70.42±0.65 g	6.71±0.07 g	21	0.154±0.002 g

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),标不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。下表同。

Note: Different lowercase letters represent significant difference at $P<0.05$ level, different capital letters represent very significant difference at $P<0.01$ level. The same below.

2.1.2 茎 围 由表 3 可以看出,烟草旺长期,不

同灌溉方式处理茎围均高于 CK,除 XL 处理外,其

他处理均达显著性水平($P < 0.05$),其中最大值为沟灌 GH 达 7.55 cm,较 CK 提高 81.9%;同一灌溉方式下,各灌溉处理中仅高水与低水处理间差异显著($P < 0.05$),并分别以 GH、XH 和 DH 处理最大;不同灌溉方式之间,沟灌处理对茎围的影响最大,滴灌次之,穴灌最小。烟草成熟期,不同灌溉方式处理的茎围均显著高于 CK($P < 0.05$),其中以 DH 处理最大,达到 9.22 cm,较 CK 提高 37.0%;同一灌溉方式下,沟灌以 GL、GH 处理间差异显著($P < 0.05$),穴灌、滴灌各处理间均达到差异显著性水平($P < 0.05$),最大分别为 XH 处理 9.11 cm、DH 处理 9.22 cm;不同灌溉方式之间,沟灌、穴灌、滴灌处理的茎围均值分别较 CK 提高 15.92%,20.87%和 22.96%。从旺长期到成熟期,滴灌和穴灌对茎围的影响明显强于沟灌。因此,合理的灌水处理对烟草茎围增加有明显效果。

2.1.3 有效叶片数 由表 3 可见,烟草旺长期和成熟期,与 CK 相比,各处理有效叶片数之间差异均不明显。由旺长期到成熟期,叶片数从 11.5 片增加到 21.7 片,2 个生育期各灌溉处理间叶片数差异均不显著。

2.1.4 单叶面积(LA) 由表 3 可见,烟草旺长期,除 GL、XL 处理外,其他不同灌溉方式处理的 LA 均显著大于 CK($P < 0.05$),其中 DH 处理最大值为 0.132 m²,较 CK 提高 83.3%;同一灌溉方式下,沟灌、穴灌和滴灌处理中均以高水处理的 LA 最大,且高水与低水处理间差异显著($P < 0.05$);不同灌溉方式之间,沟灌、滴灌处理的 LA 均值相等,都是 0.110 m²,穴灌为 0.100 m²。烟草成熟期,不同灌溉方式处理的 LA 均显著高于 CK($P < 0.05$),且 DM、DH 处理极显著高于 CK($P < 0.01$),以 DH 处理最大,达到 0.275 m²,较 CK 提高 55.80%;同一灌溉方式下,沟灌 GM 处理(0.194 m²)、穴灌 XM 处理(0.208 m²)均显著高于其他 2 个处理($P < 0.05$),滴灌各处理间差异显著($P < 0.05$);不同灌溉方式对 LA 影响从沟灌、穴灌和滴灌逐渐增强,各处理均值分别为 0.180,0.200 和 0.240 m²。叶面积在旺长期不同处理间差异较小,但成熟期差异较大,其中滴灌各处理 LA 均值成熟期较旺长期增加 0.130 m²。因此,烟草成熟期采取合理的灌水处理较不灌水处理均能有效改善烟叶 LA,其中以滴灌效果最为明显。

2.2 不同灌水处理对烟叶光合特性的影响

2.2.1 净光合速率 P_n 由表 4 可以看出,与 CK 相比,各灌水处理 P_n 值均高于 CK,除 GL 和 XL 处理外,其他处理均有显著差异($P < 0.05$),其中 DM

处理较 CK 提高 20.28%,差异达极显著水平($P < 0.01$)。同一灌溉方式下,沟灌 GH 处理 P_n 值最大,较 CK 提高 9.15%,与 GL 处理间差异显著($P < 0.05$);穴灌各处理间 P_n 值差异较显著($P < 0.05$),XM 处理最大,较 CK 提高 11.73%;滴灌 DM 处理的 P_n 值最大,较 CK 处理提高 20.28%。不同灌溉方式间以滴灌对 P_n 值影响最大,均值为 5.74 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 CK 提高 14.12%,沟灌与穴灌 P_n 均值分别为 5.33,5.32 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。因此,3 种灌溉方式都可不同程度地提高烟草旺长期的净光合速率,有利于烟草光合产物的形成与干物质积累,且以滴灌提高最为明显。

2.2.2 蒸腾速率 T_r 由表 4 可以看出,与 CK 相比,除沟灌 GM、GH 处理外,其他处理 T_r 值均低于 CK,且差异显著($P < 0.05$),其中穴灌 XH 处理最小,较 CK 降低 22.44%。同一灌溉方式下,沟灌随灌水量增加 T_r 依次增大,且 GL 与 GM、GH 处理间差异显著($P < 0.05$),穴灌和滴灌 T_r 值以 XH、DH 处理最低,分别较 CK 降低 22.44%和 14.77%,且 XM 处理与 XL、XH 处理间差异显著($P < 0.05$)。不同灌溉方式下穴灌、滴灌 3 个处理 T_r 均值分别为 2.43 和 2.67 mmol/(m² · s),较 CK 降低 19.80%和 11.88%,沟灌 3 个处理 T_r 均值基本维持 CK 水平。因此,在旺长期穴灌和滴灌均能不同程度降低烟叶蒸腾速率。

2.2.3 气孔导度 G_s 由表 4 可以看出,与 CK 相比,除 XH、DM 处理外,其他处理 G_s 值差异均达显著水平($P < 0.05$),其中沟灌全部处理以及 XM 和 DH 处理较 CK 增加,而 XL 和 DL 处理较 CK 降低,且达到极显著水平($P < 0.01$),其中 XL 处理较 CK 降低 33.34%。同一灌溉方式下,沟灌各处理 G_s 值均显著大于 CK,其中 GM 处理较 CK 提高 26.32%,GL 处理与 GM、GH 处理间差异显著($P < 0.05$);穴灌各处理间 G_s 差异显著($P < 0.05$);滴灌各处理随灌水量的增加 G_s 值依次增大,且处理间差异显著($P < 0.05$)。不同灌溉方式间以穴灌各处理 G_s 均值的降低幅度最大,为 339.63 mmol/(m² · s),较 CK 降低 10.62%,滴灌次之,为 364.18 mmol/(m² · s),沟灌为 459.21 mmol/(m² · s),高于 CK。因此,穴灌和滴灌均不同程度降低了烟叶气孔导度。

2.2.4 胞间 CO₂ 浓度和羧化速率 由表 4 可以看出,与 CK 相比,不同处理对烟草 C_i 的影响较小,差异不显著($P > 0.05$),但 GM 处理的烟草 C_i 显著高于 XM、DM 处理($P < 0.05$);沟灌、穴灌和滴灌各处

理的 C_i 均值依次为 315.99, 282.29 和 278.79 mmol/mol, 其中沟灌处理 C_i 均值大于 CK。与 CK 相比, XM、DL、DM 处理叶片 CE 值显著高于 CK ($P<0.05$), 其他处理与 CK 差异不显著 ($P>0.05$); 同一灌溉方式下, 沟灌各处理间叶片 CE 值差异不显著 ($P>0.05$), 穴灌、滴灌叶片的 CE 值 XM、DM 处理分别显著大于其他 2 种灌水处理 ($P<0.05$), 同时随灌水量的增加沟灌 CE 值依次增加, 穴灌和滴灌叶片 CE 值则按低—高一低趋势变化; 沟灌、穴灌、滴灌的叶片 CE 均值依次为 0.017, 0.019 和 0.020 mmol/(m²·s), 其中沟灌处理与 CK 接近。因此, 穴灌和滴灌各灌水处理明显降低了烟草胞间 CO₂ 浓度, 并明显提高了烟草叶片的羧化速率。

表 4 不同灌溉方式对烟叶光合参数的影响
Table 4 Effects of different irrigation methods on leaf photosynthesis parameters of flue-cured tobacco

灌水处理 Irrigation treatment	净光合速率 P_n / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r / ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s / ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 C_i / ($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	羧化速率 CE / ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	瞬时水分利用 效率 WUE_i / ($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)
GL	5.12±0.06 d	2.95±0.02 c	431.00±2.67 b	307.89±4.56 ab	0.016 6±0.000 1 de	1.74±0.01 e
GM	5.38±0.04 bc	3.04±0.02 b	479.16±8.36 a	322.67±11.50 a	0.016 9±0.000 4 d	1.78±0.00 d
GH	5.49±0.07 bc	3.12±0.02 a	467.48±8.85 a	317.42±7.08 a	0.017 4±0.000 1 cd	1.75±0.02 e
平均 Average	5.33	3.04	459.21	315.99	0.017 0	1.76
XL	5.09±0.06 de	2.41±0.02 e	253.42±3.12 fB	283.45±12.78 ab	0.017 5±0.000 6 cd	2.05±0.01 b
XM	5.62±0.04 b	2.54±0.03 d	405.47±4.99 c	251.75±4.92 b	0.022 4±0.000 3 ab	2.21±0.01 aA
XH	5.24±0.04 c	2.35±0.02 f	360.00±2.64 d	311.66±5.41 ab	0.016 8±0.000 2 d	2.23±0.00 aA
平均 Average	5.32	2.43	339.63	282.29	0.019 0	2.16
DL	5.37±0.07 bc	2.68±0.03 cd	320.75±1.99 eA	281.67±13.02 ab	0.019 2±0.000 6 bc	2.01±0.00 bc
DM	6.05±0.04 aA	2.69±0.03 cd	360.84±2.23 d	263.13±18.46 b	0.023 7±0.001 6 a	2.25±0.01 aA
DH	5.79±0.03 b	2.64±0.02 cd	410.96±2.54 bc	291.56±9.43 ab	0.017 9±0.000 5 cd	1.98±0.00 c
平均 Average	5.74	2.67	364.18	278.79	0.020 0	2.08
CK	5.03±0.04 de	3.03±0.02 b	380.89±2.36 d	299.72±11.14 ab	0.016 9±0.000 5 d	1.66±0.00 f

2.3 不同灌水处理对烟草产量及水分利用效率的影响

表 5 结果显示, 各灌水处理烟草产量均明显高于 CK, 且均达到极显著水平 ($P<0.01$), 其中 DM 处理产量最高, 较 CK 提高 47.19%。滴灌、沟灌和穴灌 3 个处理的产量均值分别较 CK 提高 38.64%, 32.01% 和 23.31%。同一灌溉方式下, 沟灌的 GL 处理与其他 2 个处理及穴灌和滴灌各处理间差异均达显著水平 ($P<0.05$); 沟灌、穴灌随灌水量增加产量依次递增, 3 种灌溉方式分别以 GH、XH、DM 处理产量最高, 滴灌的增产效果较明显。表 5 表明, 穴灌、沟灌和滴灌处理的上等烟比例分别较 CK 提高 40.73%, 41.81% 和 49.25%, 均达到显著水平 ($P<0.05$)。同一灌溉方式下不同灌水处理间差异不显著 ($P>0.05$), 除 GH 处理外, 其余处理产量均随灌水量增加而依次提高。

2.2.5 瞬时水分利用效率 由表 4 可以看出, 不同灌水处理烟草的 WUE_i 均显著大于 CK, 其中 XM、XH 及 DM 处理与 CK 差异达到极显著水平 ($P<0.01$), 以 DM 处理最大, 达到 2.25 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$, 较 CK 提高 35.54%。同一灌溉方式下, 沟灌 GM 处理与其他 2 个处理间差异达显著水平 ($P<0.05$), 随灌水量增加穴灌处理 WUE_i 依次增加, XH 处理最大, 达到 2.23 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$; 随灌水量增加, 滴灌处理 WUE_i 值呈现低—高一低的变化趋势。不同灌溉方式下, 穴灌、滴灌和沟灌处理的均值依次为 2.16, 2.08 和 1.76 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$, 分别较 CK 提高 23.15%, 20.19% 和 5.68%。因此, 各灌水处理均能有效提高烟草旺长期水分利用率, 且穴灌和滴灌效果更为显著。

表 5 显示, 不同灌水处理烟草耗水量明显高于 CK ($P<0.05$); 沟灌、穴灌和滴灌的耗水量分别较 CK 提高 30%, 18.07% 和 20.07%; 同一灌溉方式下 3 个处理间差异均不显著 ($P>0.05$)。表 5 表明, 滴灌各灌水处理及穴灌 XH 处理 WUE_y 均显著高于 CK ($P<0.05$), 且 DM、DH 及 XH 处理与 CK 差异均达极显著水平 ($P<0.01$); 不同灌溉方式间滴灌 DM、DH 处理 WUE_y 显著高于沟灌和穴灌各处理, 差异均达显著水平 ($P<0.05$), 最高值达到 5.69 kg/(hm²·mm), 较 CK 提高 23.97%。沟灌、穴灌和滴灌的 WUE_y 均值分别较 CK 提高 1.53%, 4.36% 和 15.47%。因此, 各灌水处理均可提高烟草产量水平的水分利用效率, 且以滴灌效果最为明显。

综上所述, 在烟叶伸根中后期及旺长前中期干旱情况下, 进行合理灌水可显著促进烟叶产量、上等

烟比例增加及水分利用效率提升;3 种灌溉模式中滴灌对烟叶的增产节水效果最明显,穴灌次之,沟灌较差,不同灌溉方式下以沟灌 GM 处理、穴灌 XH

处理和滴灌 DM 处理效果较为理想,其中 DM 处理最优。

表 5 不同灌溉方式对烟草产量及水分利用效率的影响

Table 5 Effects of different irrigation methods on yield and water use efficiency of flue-cured tobacco

灌水处理 Irrigation treatment	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	上等烟比例/% Rate of superior class leaves	耗水量/mm Water consumption	水分利用效率 WUE _y / (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹) Water use efficiency
GL	2 297.08±32.82 dB	58.65±2.74 a	492.61±8.15 abc	4.66±0.02 de
GM	2 378.91±13.85 cAB	61.42±3.67 a	509.47±13.46 ab	4.67±0.10 de
GH	2 395.97±22.75 cAB	59.37±3.22 a	516.31±9.87 a	4.64±0.05 e
平均 Average	2 357.32	59.81	506.13	4.66
XL	2 009.89±25.76 fB	57.80±4.31 a	437.20±10.37 d	4.60±0.06 e
XM	2 206.57±12.50 eB	60.90±2.13 a	466.51±13.47 cd	4.73±0.11 de
XH	2 389.85±18.22 cAB	62.10±2.77 a	475.44±16.53 c	5.03±0.14 bcAB
平均 Average	2 202.10	60.27	459.71	4.79
DL	2 257.41±26.30 deB	62.00±4.38 a	458.32±6.45 cd	4.93±0.02 cd
DM	2 628.47±26.07 aA	63.50±2.95 a	461.67±9.57 cd	5.69±0.07 aA
DH	2 541.43±37.74 bA	64.80±2.13 a	482.42±7.12 bc	5.27±0.00 bA
平均 Average	2 475.77	63.43	467.47	5.30
CK	1 785.79±19.12 g	42.50±1.85 b	389.34±6.01 e	4.59±0.15 e

3 讨 论

研究表明,科学的水分调控能促进烟草快速生长,增大叶面积与茎围、增加茎秆高度^[10]。本研究中,不同灌溉方式下各生育期株高、茎围和单叶面积等生长指标变化表现为滴灌最好,穴灌次之,沟灌最差,以 DH 处理效果较好;同一灌溉方式下各处理的生长指标也随灌水量的增加依次递增。从烟草移栽后 38 d(旺长期)到移栽后 82 d(成熟期),这一阶段是烟草生长最旺盛、光合能力最强和干物质积累最关键的时期,同时也是需水量较高、对水分调控最敏感的阶段;在此阶段通过不同灌溉方式下水分调控处理,使影响烟草生长的重要生物学指标——植物细胞壁扩展蛋白(Expansis, EXP)活性在水分调控与复水过程中得到提升^[11-12],促使其积极参与细胞增大、果实发育、花粉管形成、根系生长以及植物细胞衰老等活动过程^[13],从而促进烟草叶片迅速增厚、叶面积增大,对烟叶光合能力提高、植株生长与产量形成也产生了积极影响。因此,通过不同灌溉方式下适度的水分调控处理能够使烟草 EXP 活性得到提升,有效促进烟草健康快速生长。本研究发现,同一灌溉方式,低水处理的烟草叶面积等生长指标有一定降低,这是由于水分胁迫时植物可产生激素降低生长速率以应对根际水分亏缺^[14],并通过自身生理过程与形态特征的调节以适应生长环境中水分的变化^[15]。

不同灌溉方式对烟草光合特性的影响比较复

杂。光合作用是植物通过叶片叶绿素利用 CO₂ 和水将光能转变成化学能的生理生化过程,水分胁迫是植物光合作用抑制的最关键的环境因子,同时,作物对水分的吸收利用与灌溉方式和灌水量密切相关,而作物根系对灌溉水的吸收利用直接影响其光合等生理特性。本研究发现,滴灌处理的烟叶 P_n 有明显提高,WUE_i 总体较高;沟灌虽随灌水量增加 P_n 也显著提高,但 WUE_i 较低;穴灌由于灌水量相对较少,G_s 总体较低,一定程度上抑制了光合等生理代谢过程,这与张正斌^[16]的研究结论一致,因为气孔是植物叶片与外界气体进行交换的主要通道,通过气孔开闭可以达到控制光合作用过程中 CO₂ 吸收和蒸腾作用中水分的散失^[17]。气孔导度大小一定程度上决定着叶片光合作用和蒸腾作用的强弱。本研究结果表明,水分调控会诱导气孔导度变化,水分亏缺越严重,气孔导度越小,也证实了 Chernyadev^[18]提出的“水分胁迫条件下植物通过调节气孔导度、细胞结构和关联蛋白的合成增加对干旱胁迫进行抵御”的观点。本研究发现,各灌水处理 G_s 与 T_r 总体上变化趋势较为一致,佐证了汪耀富等^[19]“干旱胁迫时水分调控引发烟草叶片 G_s 和 T_r 减弱,以维持体内水分平衡”的观点;张恒嘉等^[20]也认为,水分胁迫会诱导 G_s 降低,且水分胁迫程度越大 G_s 越小。本研究发现,穴灌、滴灌各灌水处理的 P_n 和 G_s 变化与 C_i 变化相反,说明叶片净光合速率下降是受非气孔因素限制^[21-23],P_n 下降并不是由 G_s 下降使 CO₂ 供应减少所致,而是由非气孔因素阻碍

CO₂ 利用,造成 C_i 的积累,这与 Robredo 等^[24]、Ghobadi 等^[25]的结论相一致。本研究发现,不同灌溉方式对烟叶 WUE_i 的影响均呈现出显著差异,其中沟灌由于水分胁迫程度较低,使得叶片 T_r 降幅较小,而在 P_n 下降较少的情况下明显提高了烟叶 WUE_i ,滴灌和穴灌的 T_r 下降显著,这与刘永贤等^[4]、蔡寒玉等^[26]、汪耀富等^[27]和梁宗锁等^[28]的结论相近。

产量和水分利用效率是决定烟草栽培经济效益的重要指标。本研究发现,穴灌高水处理(XH)产量与沟灌高水处理(GH)无显著差异,滴灌中水、高水处理(DM、DH)产量较高且高于 GH 处理, WUE_y 也显著提高。因此,适宜的高效节水灌溉模式在节约灌溉用水的同时可使产量与 WUE_y 明显提高。这主要是因为沟灌灌水量相对较大,土壤含水率较高,根区土壤通气性降低,抑制了根系活性,使得根系分布较浅且吸水性降低,不利于根系对土壤深层水分、养分的吸收利用。李建明等^[29]发现,番茄叶片净光合速率、产量随灌溉上限的增加而先上升后降低,与本研究结果相近。水分精准供给是影响烟草产量与水分利用效率的重要因素,且对促进“以水调肥”具有积极作用^[30-32],而滴灌更有利于促进水肥耦合的协同作用,促进增产增收和水分利用效率的提高。Biglouei 等^[33]证实,灌溉的频率和水量不仅与烟叶产量有关,也与烟叶等级评价指数(GRI)产值关系密切^[34]。同时,烟草进入成熟期打顶后,叶片自下而上陆续成熟,其生理活动主要是光合产物与干物质的形成、转化和积累,在施肥水平一定的情况下,滴灌中水、高水处理的水分调控可有效促进烟叶诱发复水后的生长超补偿效应^[35],使复水后烟草生理活动旺盛,茎秆迅速增高变粗,叶面积增大,光合产物与干物质更多地向叶片转移分配,为增产奠定了良好基础。

4 结 论

1)不同灌溉方式下合理的水分调控能有效提升烟草生长特性与光合能力。滴灌各灌水处理对烟草株高、茎围和叶面积的提升最明显,以 DM、DH 处理最优,与对照差异达极显著水平($P < 0.01$);滴灌、穴灌在显著提高烟草叶片净光合速率的同时降低了蒸腾速率和气孔导度,使得叶片羧化速率与瞬时水分利用效率显著提高,以 XH、DM 处理效果最明显。

2)不同灌溉方式下滴灌处理烟草的产量和水分

利用效率优于沟灌和穴灌。沟灌对于烟草生长特性和产量均有较大提升,其中 GM 处理效果相对较优,但耗水量较高, WUE_y 较低;滴灌各处理在产量、上等烟叶比例和水分利用效率等方面均优于穴灌和沟灌,其中 DM 处理产量、上等烟比例及 WUE_y 分别达到 2 628.47 kg/hm², 63.5% 和 5.69 kg/(hm²·mm),较 CK 提高 47.19%, 49.41% 和 23.97%;穴灌各处理虽在产量上略低于沟灌,但上等烟比例、 WUE_y 均高于沟灌,其中 XH 处理的产量、上等烟比例及 WUE_y 分别达到 2 389.85 kg/hm², 62.1% 和 5.03 kg/(hm²·mm)。

3)滴灌、穴灌对烟草生长、光合、产量和水分利用效率各项指标的影响明显优于沟灌,其中,滴灌最佳灌溉模式为 DM(中水)处理,即成熟期灌水定额 4.8 mm、全生育期灌水 6 次、灌溉定额 28.8 mm,为最适宜的推广模式;穴灌最佳灌溉模式为 XH(高水)处理,即成熟期灌水定额 3.2 mm、全生育期灌水 6 次、灌溉定额 19.2 mm,在经济条件较差的缺水地区具有良好的推广潜力。

[参考文献]

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Issues in the global tobacco economy: Selected case studies [M]. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations, Raw Materials, Tropical and Horticultural Products Service, Commodities and Trade Division, 2003.
- [2] 樊雪志. 中国烟草农业的发展现状及趋势分析 [EB/OL]. <http://www.cet.com.cn/wzsy/gysd/1076761.shtml>. 2013-12-31.
Fan X Z. Analysis of the development status and trends of Chinese tobacco agriculture [EB/OL]. <http://www.cet.com.cn/wzsy/gysd/1076761.shtml>. 2013-12-31. (in Chinese)
- [3] 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.
Han J F, Wang Y F, Qian X G, et al. Tobacco cultivation physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 刘永贤, 李伏生, 农梦玲. 烤烟不同生育时期分根区交替灌溉的节水调质效应 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 16-20.
Liu Y X, Li F S, Nong M L. Effects of alternate partial root-zone irrigation on water saving and quality regulating of flue-cured tobacco at different growth stages [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 16-20. (in Chinese)
- [5] 刘国顺, 王 行, 史宏志, 等. 不同灌水方式对烤烟光合作用的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 85-88.
Liu G S, Wang H, Shi H Z, et al. Effects of different irrigation methods on photosynthesis of flue-cured tobacco [J]. Journal

- of Irrigation and Drainage, 2009, 28(3): 85-88. (in Chinese)
- [6] 周宽余, 卢志俊, 陈玉仓. 穴灌对旱地烤烟产值及品质的影响 [J]. 中国烟草科学, 1999, 20(1): 15-17.
Zhou K Y, Lu Z J, Chen Y C. Effect of hole irrigation on the output value and quality of flue-cured tobacco [J]. Chinese Tobacco Science, 1999, 20(1): 15-17. (in Chinese)
- [7] Bilalis D, Karkanis A, Efthimiadou A, et al. Effects of irrigation system and green manure on yield and nicotine content of Virginia (flue-cured) organic tobacco (*Nicotiana tabacum*), under mediterranean conditions [J]. Industrial Crops and Products, 2009, 29(2): 388-394.
- [8] Cakir R, Cebib U. The effect of irrigation scheduling and water stress on the maturity and chemical composition of Virginia tobacco leaf [J]. Field Crops Research, 2010, 119(2): 269-276.
- [9] Ruiz J M, Blasco B, Rivero R M, et al. Nicotine-free and salt-tolerant tobacco plants obtained by grafting to salinity-resistant rootstocks of tomato [J]. Physiol Plant, 2009, 124(4): 465-475.
- [10] 周永波, 邵孝侯, 苏贤坤, 等. 水分调控对烤烟生长、干物质积累和养分吸收的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 56-59.
Zhou Y B, Shao X H, Su X K, et al. Effects of soil moisture regulation on growth and dry matter accumulation and nutrient absorption of flue-cured tobacco [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 56-59. (in Chinese)
- [11] 孙伟峰, 周志磊, 殷春燕. 酶解细胞壁对低等级烟叶品质的改良作用 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(7): 70-76.
Sun W F, Zhou Z L, Yin C Y. Enzymatic degradation of cell wall substances to improve quality of low grade tobacco [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2014, 42(7): 70-76. (in Chinese)
- [12] Jones L, McQueen-Mason S. A role for expansins in dehydration and rehydration of the resurrection plant *Craterostigma plantagineum* [J]. Febs Letters, 2004, 559(1): 61-65.
- [13] 童斌, 饶景萍, 任小林, 等. 植物细胞壁扩展蛋白研究进展 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(9): 112-115.
Tong B, Rao J P, Ren X L, et al. Studying progress of plant cell wall proteins expansins [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(9): 112-115. (in Chinese)
- [14] 李博, 赵斌, 彭容豪. 陆地生态系统生态学原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 83-127.
Li B, Zhao B, Peng R H. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 83-127. (in Chinese)
- [15] Coopman R E, Jara J C, Bravo L A, et al. Changes in morphophysiological attributes of *Eucalyptus globulus* plants in response to different drought hardening treatments [J]. Electron Journal of Biotechnology, 2008, 11(2): 1-10.
- [16] 张正斌. 作物抗旱节水的生理遗传育种基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Zhang Z B. Fundamentals of physiology and genetics and breeding in crop drought resistance and water saving [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [17] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought [J]. New Phytologist, 2008, 178: 719-739.
- [18] Chernyadev I I. Effect of water stress on the photosynthetic apparatus of plants and the protective role of cytokinins: A review [J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2005, 41(2): 115-128.
- [19] 汪耀富, 韩锦峰, 林学梧. 烤烟生长前期对干旱胁迫的生理生化响应研究 [J]. 作物学报, 1996, 22(1): 117-121.
Wang Y F, Han J F, Lin X W. Study on physiological and biochemical responses of flue-cured tobacco to drought stress during early growth of the plants [J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(1): 117-121. (in Chinese)
- [20] 张恒嘉, 李晶. 绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 143-151.
Zhang H J, Li J. Photosynthetic physiological characteristics and water use of potato with mulched drip irrigation under water deficit in oasis region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 143-151. (in Chinese)
- [21] 曹慧, 兰彦平, 王孝威, 等. 果树水分胁迫研究进展 [J]. 果树学报, 2001, 18(2): 110-114.
Cao H, Lan Y P, Wang X W, et al. Research and progress on water stress in fruit trees [J]. Journal of Fruit Science, 2001, 18(2): 110-114. (in Chinese)
- [22] Klaus W, Michael J S. Analysis of stomatal and nonstomatal components in the environmental control of CO₂ exchanges in leaves of *welwitschia mirabilis* [J]. Plant Physiology, 1986, 82(1): 173-178.
- [23] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.
- [24] Robredo A, Perez-Lopez U, Lacuesta M, et al. Influence of water stress on photosynthetic characteristics in barley plants under ambient and elevated CO₂ concentrations [J]. Biologica Plantarum, 2010, 54(2): 285-292.
- [25] Ghobadi M, Taherabadi S, Ghobadi M E, et al. Antioxidant capacity, photosynthetic characteristics and water relations of sunflower cultivars in response to drought stress [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 50: 29-38.
- [26] 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): 11-12, 15.
Cai H Y, Wang Y F, Li J P, et al. Study on physiological basis of controlled partial-rootzone alternative irrigation for flue-cured tobacco [J]. Water Saving Irrigation, 2006(2): 11-12, 15. (in Chinese)
- [27] 汪耀富, 蔡寒玉, 张晓海, 等. 分根交替灌溉对烤烟生理特性和烟叶产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 93-98.
Wang Y F, Cai H Y, Zhang X H, et al. Effects of root-divided alternative irrigation on physiological characteristics and yield

- of flue-cured tobacco [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(5): 93-98. (in Chinese)
- [28] 梁宗锁, 康绍忠, 高俊凤, 等. 根交替渗透胁迫与脱落酸对玉米根系生长和蒸腾速率的影响 [J]. *作物学报*, 2000, 26(3): 250-255.
- Liang Z S, Kang S Z, Gao J F, et al. Effect of abscisic acid (ABA) and alternative split root osmotic stress on root growth and transpiration efficiency in maize [J]. *Acta Agonomica Sinica*, 2000, 26(3): 250-255. (in Chinese)
- [29] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 82-90.
- Li J M, Pan T H, Wang L H, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 82-90. (in Chinese)
- [30] 于亚军, 李 军, 贾志宽, 等. 不同水肥条件对宁南旱地谷子产量、WUE 及光合特性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2006, 13(2): 87-90.
- Yu Y J, Li J, Jia Z K, et al. Effect of different water and fertilizer on yield WUE and photosynthetic characteristics of millet in southern Ningnan semi-arid area [J]. *Research of Water and Soil Conservation*, 2006, 13(2): 87-90. (in Chinese)
- [31] 吴海卿, 杨传福, 孟兆江, 等. 以肥调水提高水分利用效率的生物学机制研究 [J]. *灌溉排水学报*, 1998, 17(4): 7-11.
- Wu H Q, Yang C F, Meng Z J, et al. A study on biological mechanism of raising water use efficiency by suitable application of fertilizers [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1998, 17(4): 7-11. (in Chinese)
- [32] 王利超, 王 涵, 朴世领, 等. 铵硝氮配比对烤烟生长生理及产量和品质的影响 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(12): 136-144.
- Wang L C, Wang H, Piao S L, et al. Effects of different nitrogen forms on the growth, photosynthesis, yield and quality of tobacco [J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed*, 2012, 40(12): 136-144. (in Chinese)
- [33] Bigloui M H, Assimi M H, Akbarzadeh A. Effect of water stress at different growth stages on quantity and quality traits of Virginia (flue-cured) tobacco type [J]. *Plant Soil Environ*, 2010, 56(2): 67-75.
- [34] Caldwell E F, Leib B G, Buchanan J R. Tobacco irrigation: Supplemental watering of a high value, drought tolerant crop in a humid region [J]. *Appl Eng Agric*, 2010, 26(1): 39-46.
- [35] Olejniczak P. Over compensation in response to simulated herbivory in the perennial herb *sedum maximum* [J]. *Plant Ecology*, 2011, 212(11): 1927-1935.

(上接第 44 页)

- [12] 冯 伟, 朱 艳, 田永超, 等. 基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量 [J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 23-32.
- Feng W, Zhu Y, Tian Y C, et al. Monitoring leaf nitrogen accumulation with hyper-spectral remote sensing in wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 23-32. (in Chinese)
- [13] 李映雪, 朱 艳, 田永超, 等. 小麦叶片氮含量与冠层反射光谱指数的定量关系 [J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 358-362.
- Li Y X, Zhu Y, Tian Y C, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 358-362. (in Chinese)
- [14] 宋英博. 不同施氮水平下大豆反射光谱预测叶片氮含量模型 [J]. *大豆科学*, 2010, 29(4): 641-644.
- Song Y B. Predicting model of soybean leaf nitrogen content by leaf reflectance spectra under different nitrogen supply levels [J]. *Soybean Science*, 2010, 29(4): 641-644. (in Chinese)
- [15] 周冬琴, 田永超, 姚 霞, 等. 水稻叶片全氮浓度与冠层反射光谱的定量关系 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 337-344.
- Zhou D Q, Tian Y C, Yao X, et al. Quantitative relationships between leaf total nitrogen concentration and canopy reflectance spectra of rice [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 337-344. (in Chinese)
- [16] 吴华兵, 朱 艳, 田永超, 等. 棉花冠层高光谱指数与叶片氮积累量的定量关系 [J]. *作物学报*, 2007, 33(3): 518-522.
- Wu B H, Zhu Y, Tian Y C, et al. Relationship between canopy hyperspectral index and leaf nitrogen accumulation in cotton [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(3): 518-522. (in Chinese)
- [17] 朱 艳, 吴华兵, 田永超, 等. 基于冠层反射光谱的棉花叶片氮含量估测 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2263-2268.
- Zhu Y, Wu H B, Tian Y C, et al. Estimation of nitrogen concentration in cotton leaf based on canopy reflectance spectra [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10): 2263-2268. (in Chinese)