

丁从慧,申双和,陶苏林,等.玉米根-冠及叶片水分利用效率对土壤水分的响应[J].江苏农业科学,2015,43(10):108-111.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.10.033

玉米根-冠及叶片水分利用效率对土壤水分的响应

丁从慧^{1,3}, 申双和^{1,2}, 陶苏林¹, 李 萌¹, 喻 丽¹

(1. 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/南京信息工程大学应用气象学院, 江苏南京 210044;

2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 江苏南京 210044; 3. 安徽省气象台, 安徽合肥 230031)

摘要:以夏玉米为试材,利用移动式遮雨棚和自动滴管系统设计 5 个不同水分处理(为田间持水量的 35% ~ 45%、50% ~ 60%、65% ~ 75%、80% ~ 90%、95% ~ 105%)试验,观测、分析各处理的根-冠干质量、叶面积指数(LAI)、叶片光合速率特性和叶片水分利用效率(WUE)对不同土壤水分的响应。结果表明:在整个生长期,各水分处理下玉米根系干质量均呈先上升后平稳再下降的趋势,且水分胁迫处理下平均根干质量均低于充分供水处理;水分胁迫越重,LAI 越小,且干旱胁迫处理对 LAI 的影响大于轻度淹水处理;干旱胁迫越严重,玉米根-冠干物质质量减小越明显,最大根冠比(R/S)出现的时间也相应越早;水分胁迫处理下,玉米叶片净光合速率和蒸腾速率均低于充分供水处理,播后 56 d 的净光合速率和播后 65 d 的蒸腾速率对水分更敏感,中度胁迫处理下玉米在播后 56 d 叶片水分利用效率最大。相关分析结果表明,根质量与冠质量呈显著相关($P < 0.05$),根冠比与 WUE 呈极显著性负相关($P < 0.01$)且根冠比可作为水分监测指标。本研究结果可为夏玉米干旱灾害机理和田间管理提供科学依据。

关键词:夏玉米;根-冠干物质;叶面积指数;根冠比;水分利用效率

中图分类号: S152.7; S513.07 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)10-0108-04

水资源南北分布差异大,是制约我国农业发展的重要因素之一。土壤水分含量影响作物的物质分配及其根冠的生长,作物的水分利用效率(WUE)不仅能反映作物能量转化效率,也是评价作物生长适宜程度的综合生理生态指标^[1]。玉米是我国重要的粮食作物之一,不同生育期对土壤水分含量的响应差异较大,因此研究水分对玉米生长发育的影响具有重要意义。根系是吸收水分的器官,而叶冠是利用水分进行光合作用、散失水分的主要器官,近年来,国内外关于根-冠联系的报道很多。已有研究证实,根冠结构与功能处于均衡状态时,二者生长比例协调、产量和资源利用效率较高^[2];根冠协调生长是提高作物 WUE 和产量的基础^[3],而根冠比能较好地反映不同土壤水分含量对植株地上部分与地下部分生物量的相互关系,也是反映干物质协调积累状况的重要指标,主要受环境因素和植物本身遗传特性的影响^[4-5]。陈晓远等认为,植物对水分的高效利用可归结为根、冠结构功能匹配^[5];张岁岐等通过试验证明,合理灌溉优化玉米根系分布特性可以提高玉米吸水能力和水分利用效率^[6];刘海隆等研究发现,叶水势和冠层温度可以作为作物水分胁迫的判别指标^[7]。前人的研究大多是在干旱胁迫条件下进行的,且局限于冠部性状对 WUE 的影响,而根系、冠部相互联系对 WUE

的影响是一个相对薄弱的环节,因此协调根、冠关系及功能与作物水分利用效率之间的关系是一个亟待研究的问题^[8-11]。本研究在前人关于干旱胁迫研究的基础上,增加轻度淹水处理,探索玉米根与冠、水分利用效率与根冠比之间的相互关系。本研究结果可为提高作物水分利用效率提高理论依据,同时为干旱地区玉米的抗旱栽培、优化灌溉提供实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年 7 月在南京信息工程大学农业气象试验站(32.20°N、118.70°E)电动活动式防雨棚内进行。每个小区长宽均为 2.5 m、深 1.5 m,各小区之间用钢筋水泥浇灌隔离,防止侧渗。小区上方有电动防雨棚以便隔绝降雨,土壤为潴育型水稻土,灰马肝土属,土壤质地为壤质黏土,黏粒含量约为 26.1%,土壤 pH 值(H_2O)为 6.1 ± 0.2 ,有机碳、全氮含量分别为 19.4、11.5 g/kg。以玉米品种江玉 403 为供试材料,于 2013 年 7 月 6 日播种,采用穴播,每穴播种 2 株,行距 50 cm,株距 30 cm,9 月 27 日成熟。每小区播种前(2013 年 7 月 4 日)撒施复合肥 112.5 g,播后 38 d(8 月 13 日)穴施复合肥 75.0 g。

玉米播后开始灌水控制土壤含水量至田间持水量(FC)的 80% ~ 90%,以保苗齐苗壮苗。拔节始期过后 5 d,按占田间持水量的比例开始进行水分处理,采取 5 个不同水平的水分处理:W1,重度干旱处理(35% ~ 45% FC);W2,中度干旱处理(50% ~ 60% FC);W3,轻度干旱处理(65% ~ 75% FC);W4,全生育期充分供水(80% ~ 90% FC);W5,轻度淹水处理(95% ~ 105% FC),各处理有 3 组重复即 15 个小区,随机排列,具体情况见表 1。每个小区内装有 1 个土壤水分传感器(AV-EC5, AVALON Scientific, USA),分别监测 0 ~ 10、10 ~

收稿日期:2014-10-22

基金项目:国家“973”计划(编号:2010CB950702);公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201106043、GYHY201306046);江苏省普通高校研究生科研创新计划(编号:CXZZ12_0503);江苏高校优势学科建设工程项目。

作者简介:丁从慧(1990—),女,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为应用气象学。E-mail:dcnghui45@sina.com。

通信作者:申双和,教授,主要从事农业气象、生态环境气象研究。

E-mail:yzqzhr@nuist.edu.cn。

20、20~50 cm 深度的土壤含水量,由数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, USA)自动采集并记录每 1 h 的土壤水分含量均值,计算出需要的灌水量,并连接带小孔的 PVC 管道进行自动灌溉,每次测定灌水量为 0~50 cm 土层的土壤含水量。同时,每隔 10 d 采用烘干称质量法进行人工测定土壤湿度,从而对水分传感器进行校正。全程生育期内均严格控制水分,锄草、施肥等管理同一般大田均一致。

表 1 玉米生长期灌溉方案

水分处理	土壤含水量占田间持水量的比例(%)	
	苗期	苗期以后时期
W1	80~90	35~45
W2	80~90	50~60
W3	80~90	65~75
W4	80~90	80~90
W5	80~90	95~105

1.2 测定方法

1.2.1 根的获取 用铁锹从株行间垂直切下,切入深度根据根系的长度而定,取整个土柱,然后将含有土柱的整株玉米取出,用剪刀从茎基部把根与茎分开,把根系放入准备好的尼龙网袋,放在水池里浸泡,等到土壤松软后,用水冲洗根部,得到整个完整的根,擦拭表面的尘污后立即放入准备好的网袋。选取播后 19 d(7 月 25 日)、35 d(8 月 10 日)、46 d(8 月 20 日)、56 d(8 月 31 日)、65 d(9 月 9 日)、71 d(9 月 16 日)、81 d(9 月 27 日)进行测定。

1.2.2 生物量的测定 把获取的植株除根,按叶、茎鞘、穗各器官进行分类,分别称取鲜质量,之后将样本装袋放入恒温干燥箱内加温,取样后 0 h 温度控制在 100~105℃ 杀青,以后维持在 70~80℃,12 h 后(物质的质量恒定时)将玉米分别按叶、茎鞘、根、穗称取干质量,地下部分与地上部干物质质量之比即根冠比,测定时间与“1.2.1”节一致。

1.2.3 叶面积指数的测定 采用 LAI-2000 冠层分析仪测定,每个小区选取 3 个不同的点各测 1 次,取平均值,测定时间同根获取时间一致(除播后 19 d,由于此时生育期处于 7 叶期叶面积指数较小,不宜测取)。

1.2.4 光合指标的测定 采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 型便携式光合仪进行测定,包括叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)等气体交换参数。选择气候稳定的晴天,分别于播后 56 d(8 月 31 日)、71 d(9 月 16 日)进行测定。选取完全展开功能叶 3 张,测定叶片中间部位,重复测定 3 次,于 08:00—17:00 完成。

1.2.5 水分利用效率 水分利用效率用净光合速率 P_n 与蒸腾速率 T_r 之比来表示,即 $WUE = P_n/T_r$ 。

2 结果与分析

2.1 夏玉米根冠对不同土壤水分的响应

2.1.1 根系的响应 根部干质量的积累体现了根系的生长,不同水分处理对玉米根干质量的影响见图 1。由图 1 可知,在整个生长期,根部生物量的累积呈先上升后平衡再略有下降的趋势。胁迫初期,各处理的根干质量随处理时间的延长不断增大,在播后 56 d 根干质量达到最大,在此阶段内 W4 平均日生物量增长速率为 1.218 g,比 W1、W2、W3、W5 处理

高 55.6%、40.3%、24.7%、4.98%;随着胁迫时间的继续延长,根系干质量的积累呈负增趋势,这是因为部分根系死亡、呼吸消耗等降低根系生物量,其中 W5 下降最明显,原因是长时间处于水分淹没下,根系呼吸受到抑制,根系腐烂严重等消耗了大量的同化物。

胁迫初期,各处理的根干质量差别不大,随着处理时间的延长,不同处理在生育前期的根干质量变化趋势为 $W4 > W5 > W3 > W2 > W1$,在整个生育期内 W1、W2、W3、W5 平均根干质量分别低于正常供水的 41.0%、37.29%、20.34%、10.89%,表明干旱胁迫对根系干质量的影响大于轻度水分淹没。

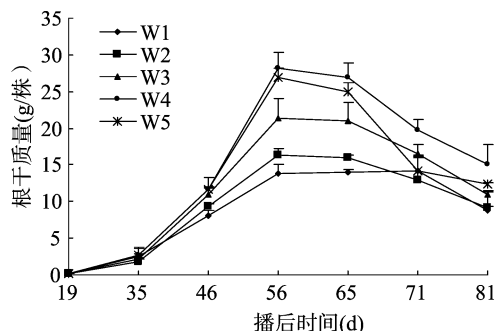


图1 不同土壤水分处理下夏玉米根干质量的变化

2.1.2 夏玉米冠层的响应 叶面积指数(LAI)是反映植物冠层结构变化的动态指标,为植物冠层表面物质和能量交换的描述提供结构化的定量信息。由图 2 可知,LAI 对不同水分处理的响应差异显著,从播后 35 d 到播后 71 d,LAI 基本随时间的推移而增大,且在 71 d 达到最大值,之后由于夏玉米叶片逐渐枯黄,绿叶面积减少,叶片光合功能受损,LAI 呈明显下降趋势;同一生长时间内,5 个处理的叶面积指数从大到小依次为 $W4 > W5 > W3 > W2 > W1$,在整个生长期中 W1、W2、W3、W5 的平均 LAI 较 W4 低 19.6%、10.8%、9.7%、5.8%,说明在控制水分的生育期内,随着干旱胁迫的加强,根系能量物质传输到冠层也变少,因此 LAI 减小;同时,轻度淹水也不利于叶片的生长,水分过多会影响根系的呼吸消耗,从而抑制其根系的生长发育及其冠层的生长,但其影响小于干旱胁迫处理。总体而言,不同程度的水分胁迫处理均会改变冠层结构,从而使 LAI 减小,进而影响整株植物的生理生态变化。

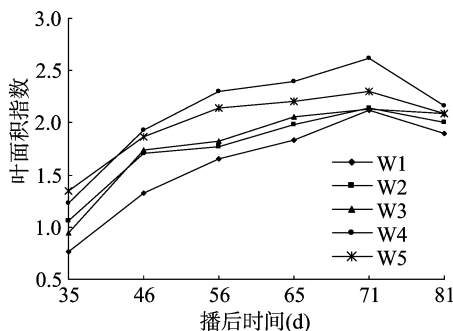


图2 不同土壤水分处理下夏玉米叶面积指数的变化

2.1.3 根冠动态响应 由表 2 可以看出,在玉米整个生长期,冠的生长量大于对应根系的生长量。同一生长期,水分胁迫越严重,其地上、地下部分的生物量减小越明显。其中,轻度淹没(W5)的根冠比在播后 56 d 较大,这可能是由于全

生育期水分轻度淹没,使得大量的同化产物运往根系,调整了根系结构,改善了根系的吸水能力,过量的水分建成庞大的根系使得根系干质量增加,冠质量增加量相对于播后 46 d 减少,根冠比相对于同期 W1 ~ W4 处理增加;充分供水(W4)、轻度淹水(W5)处理的根冠比分别在播后 56、46 d 达到最大值,而干旱胁迫处理的根冠比在播后 46 d 左右已达到最大值,说明干旱胁迫使得根冠比提前达到最大值。

表 2 夏玉米生育期根冠关系

播后时间(d)	处理	根质量 (R,g/株)	冠质量 (S,g/株)	根冠比 R/(R+S) (R/S)	(%)	S/(R+S) (%)
46	W1	8.00	20.34	0.390	28.23	71.77
	W2	9.35	32.02	0.292	22.60	77.40
	W3	11.00	41.66	0.260	20.89	79.11
	W4	11.75	46.35	0.250	20.22	79.78
	W5	11.60	36.23	0.320	24.25	75.75
56	W1	13.90	49.25	0.280	22.01	77.99
	W2	16.30	60.30	0.270	21.28	78.72
	W3	21.40	81.60	0.260	20.78	79.22
	W4	28.20	108.60	0.259	20.61	79.39
	W5	27.00	96.00	0.280	21.95	78.05
65	W1	14.10	80.82	0.174	14.85	85.15
	W2	16.00	84.32	0.190	15.95	84.05
	W3	21.00	113.72	0.185	15.59	84.41
	W4	26.52	143.86	0.184	15.57	84.43
	W5	23.56	108.00	0.218	17.91	82.09
71	W1	14.20	127.10	0.110	10.05	89.95
	W2	12.85	98.90	0.130	11.50	88.50
	W3	16.50	123.50	0.133	11.79	88.21
	W4	19.70	151.95	0.130	11.48	88.52
	W5	14.25	79.30	0.180	15.23	84.77
81	W1	8.85	252.21	0.035	3.39	96.61
	W2	9.07	238.81	0.038	3.70	96.30
	W3	10.98	293.43	0.037	3.60	96.40
	W4	15.00	323.16	0.046	4.44	95.56
	W5	12.43	297.54	0.042	4.00	96.00

在播后 56 d,分配到根-冠部的干质量持续增加,W1、W2、W3、W5 处理的冠部干质量比播后 46 d 高 83.05%、80.27%、79.34%、79.09%、72.74%,而根系干质量增量占全株干质量增量的比例为 16.95%、19.73%、20.66%、20.90%、27.26%,说明水分胁迫冠部干质量增量占整株增量比例大,水分胁迫越大,冠部干物质增长速率越先达到最大值。

在播后 65 d,由营养生长转化为穗部的生殖生长,根系的干物质除了用于自身呼吸消耗一部分能量外,其余用于冠部的生殖生长^[12],其中 W5 处理根质量占总物质量的比例最大。在播后 65 ~ 71 d 同一个生长期内,W1 略有增加,W2、W3、W4、W5 处理的根干质量减小,5 个处理冠质量均增加,W5 处理根质量占总质量的比例与其他处理的减小幅度相比最大,说明在此时间段内 W5 处理根系物质量转向冠层生长物质量最多。在播后 81 d 左右时的根系发育会受到抑制并随之衰老,功能逐步退化,不论水分情况如何,都有近 96% 的干物质累积冠部,而根干质量则只占总干质量的 4%,根冠比(0.035 ~ 0.046)变化趋于一致(这是由于根冠生物量累积是以遗传特性为基础的环境响应的体现者)。不管玉米在整个生育期如何受不同土壤水分含量的影响,成熟时期玉米根冠

比总是要恢复到物种的固有特性,体现出它的遗传特性^[13]。

2.2 叶片水分利用效率对夏玉米不同水分处理的响应

2.2.1 不同水分处理对夏玉米光合参数的影响 为揭示不同水分处理对夏玉米光合参数的影响,于播后 56、71 d 测定其叶片的光合作用参数,并提取其 P_n 与 T_r (表 3),研究发现不同水分条件下播后 56 d 的叶片光合速率、蒸腾速率明显高于播后 71 d。在播后 56、71 d,W1、W2、W3、W5 处理叶片 P_n 和 T_r 均比 W4 处理低,说明土壤干旱胁迫和轻度淹没均会使 P_n 和 T_r 降低,且土壤干旱胁迫越强, P_n 下降幅度越大。在播后 56 d,与 W4 处理相比,W1、W2、W3、W5 处理的 P_n 分别降低 17.6%、14.2%、5.22%、5.62%, T_r 降低 6.78%、7.89%、6.90%、5.36%;在播后 71 d,与 W4 处理相比,W1、W2、W3、W5 处理的 P_n 分别降低 6.53%、6.74%、2.77%、7.36%, T_r 降低 10.79%、11.33%、5.58%、4.50%。播后 56 d 的 P_n 与播后 71 d T_r 下降幅度更大,表明在不同水分处理情况下,播后 56 d P_n 与播后 71 d T_r 更敏感。

表 3 各生长期不同水分处理下的玉米 P_n 与 T_r 变化

播后时间 (d)	处理	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
56	W1	26.21 (-17.6%)	5.91 (-6.78%)
	W2	27.30 (-14.2%)	5.84 (-7.89%)
	W3	30.14 (-5.22%)	5.90 (-6.90%)
	W4	31.80	6.34
	W5	30.01 (-5.62%)	6.00 (-5.36%)
71	W1	22.61 (-6.53%)	4.96 (-10.79%)
	W2	22.56 (-6.74%)	4.93 (-11.33%)
	W3	23.52 (-2.77%)	5.25 (-5.58%)
	W4	24.19	5.56
	W5	22.41 (-7.36%)	5.31 (-4.50%)

注:括号内表示与 W4 处理相比后增加的比例。

2.2.2 不同水分处理对夏玉米水分利用效率的变化 叶片水分利用效率定义为单位水量通过叶片蒸腾散失时光合作用所形成的有机物的量,是植物消耗水分形成干物质的基本效率,也是水分利用效率的理论值^[14]。由图 3 可知,各处理(除 W1 处理)的 WUE 在播后 35 d 最高,播后 71 d 次之,播后 35 d 最小。在相同水分条件下,播后 35、71 d 玉米总体的 WUE 分别比吐丝期低 16%、11%。播后 35 d 各处理的 WUE 从大到小依次为 W4 > W3 > W2 > W1 > W5,表明 WUE 随着干旱胁迫的加重而减小,且夏玉米在生长初期生长缓慢,其干物质合成能力小,因此对水分需求不大;随着生长速率的加快,WUE 增加,播后 56 d 各处理的 WUE 从大到小依次为 W3 > W4 > W5 > W2 > W1,其中 W3 处理的 WUE 比 W4 处理高 1.76%,W1、W2、W5 处理比 W4 处理低 11.75%、6.97%、0.4%,表明中度胁迫能提高 WUE,且此时期缺少水分会影响玉米的生物量的积累量、产量等;播后 71 d 的 WUE 从大到小依次为 W2 > W1 > W3 > W4 > W5,即干旱胁迫处理的 WUE 均比充分供水高,其中 W5 处理的 WUE 最低,说明在生长后期,叶片的光合作用功能的减退减缓了生长速率。由此可见,播后 56 d 的 WUE 最高即为水分关键期,干旱处理会提高 WUE,轻度淹水处理对提高 WUE 影响小。

2.3 玉米根、冠干物质、根冠比与 WUE 之间的相关分析

为进一步分析玉米根、冠干物质与 WUE 的关系,对根-

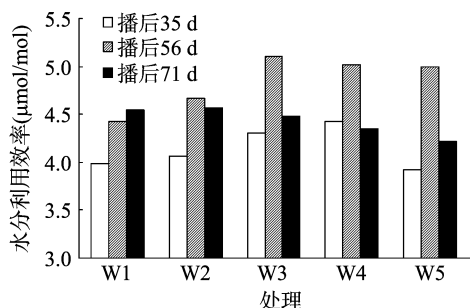


图3 不同水分处理下的夏玉米的水分利用效率

冠干物质及根冠比和 WUE 进行相关分析,结果见表 4。由表 4 可以看出,玉米根干质量与冠干质量的关系可用乘幂曲线方程拟合,拟合结果较好,说明根系与冠层有着密切的联系,根系吸收的水分和营养物质用于自身和冠层的生长,与此同时冠层的光合作用又能促进根系生长,二者是相互联系的有机整体。根冠比与 WUE 呈极显著负线性相关,说明根冠比的增加不利于 WUE 的提高。这可能是由于庞大的根系对玉米吸收水分有效,但由于消耗过多的同化物质,所以其作用相互抵消,过大或过小的根冠比均不利于提高有限的水分利用效率。由此可见,不同水分处理在一定程度上限制了根系发育,但提高了 WUE,通过适当降低根冠比可提高单叶 WUE。

表 4 根干质量与冠干质量、根冠比与 WUE 的相关分析结果

相关因子	关系式	r^2
根干质量与冠干质量	$y = 7.776x^{0.951}$	0.843 *
根冠比与 WUE	$y = -4.250x + 5.201$	0.708 **

注: *、** 分别表示显著、极显著相关。

3 结论与讨论

本研究利用遮雨棚设定 5 个不同土壤水分的处理,对夏玉米的根-冠关系及水分利用效率进行研究并作相关性分析,结果表明,作物根系与冠层(LAI)的光合作用有较好的配合时,二者生长比例相协调,能够提高 WUE。随着土壤水分含量减小,根的干物质含量也减少,且水分干旱胁迫对根系生物量的影响大于水分轻度淹没。说明土壤水分下降会降低玉米叶面积指数,缩短有效绿叶面积,增加土壤水分胁迫,从而减少干物质质量,使得最大根冠比提前出现,冠部生长速率先达到最大值,轻度淹水对根-冠干物质比例分配影响越大,因此可以通过人为控制土壤水分来改变作物根系的大小,调节根冠比、分布状况,使同化物在根系和冠层之间的分配保持协调平衡,确保作物处于最佳的生长状态,达到最优根冠比,提高水分利用效率^[15]。

植物水分利用效率是一个较稳定的衡量碳固定与水分消耗关系的指标^[16],可见,玉米播后 56 d 的光合速率与播后 71 d 蒸腾速率相对更敏感,播后 56 d 的 WUE 大于播后 35、71 d,这与白向历等的研究结果^[17]一致。不同水分条件可以改变玉米根冠关系,从而改变叶片水分利用效率,但基本趋势基本是一致的。可见,播后 56 d 是水分供给的关键期,随着夏玉米生长的进行,各生育期的水分需求存在较大的差异。

通过各相关性分析结果可知,根质量与冠质量呈显著乘幂相关($P < 0.05$),表明根系与冠层紧密联系、相互依赖、相互促进。根冠比与 WUE 呈极显著直线负相关($P < 0.01$),根

冠比可作为监测作物水分状况的指标,研究结果可为干旱半干旱地区的抗旱栽培、优化灌溉提供指导。

夏玉米的整个生长发育阶段对水分的需求至关重要,因此研究水分对玉米生长发育、根冠关系的影响有重要的意义。不同程度的水分处理对玉米的生长会造成影响,且生长期不同,玉米对土壤水分含量的响应存在差异。本试验结果表明,不同水分处理对夏玉米光合特性、根冠关系响应具有延迟性,同时所测的玉米物理特性等受外界环境干扰大,造成有些组间差异不是特别明显。叶片水分利用效率没有表现出较好的规律,是由于受异常高温天气的影响。因此,在今后试验设计中如何排除防雨棚增温效应、如何排除气象因素对测定结果的影响还有待改善,从而为提高水分利用效率、节水抗旱栽培提供理论基础。

参考文献:

- [1] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002: 163-172.
- [2] Brouwer R. Functional equilibrium: sense or nonsense[J]. Netherland Journal of Agricultural Science, 1983, 31: 335-348.
- [3] Shanguan Z. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat[J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 44(2): 141-149.
- [4] Shanguan Z P, Shao M, Ren S J, et al. Effect of nitrogen on root and shoot relations and gas exchange in winter wheat[J]. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 2004, 45(1): 49-54.
- [5] 陈晓远, 高志红, 罗远培. 植物根冠关系[J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(5): 555-562.
- [6] 张岁岐, 周小平, 慕自新, 等. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 1-6.
- [7] 刘海隆, 杨晓光. 夏玉米水分胁迫判别指标的研究[J]. 中国农业气象, 2002, 23(3): 22-26.
- [8] 李秧秧, 刘文兆. 土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 13-15.
- [9] 孟凡枝, 杨鹏鸣. 不同施肥水平对三色苜蓿根冠比和壮苗指数的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 216-218.
- [10] 侯琼, 沈建国. 春玉米根系生育特征与冠层关系的研究[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1536-1541.
- [11] 陈晓远, 刘晓英, 罗远培. 土壤水分对冬小麦根、冠干物质动态消长关系的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1502-1507.
- [12] 冯广龙, 罗远培, 刘建利, 等. 不同水分条件下冬小麦根与冠生长及功能间的动态消长关系[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(2): 76-82.
- [13] 葛体达, 隋方功, 李金政, 等. 干旱对夏玉米根冠生长的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(1): 103-109.
- [14] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99-104.
- [15] 吕谋超, 冯俊杰, 翟国亮. 地下滴灌夏玉米的初步试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 67-71.
- [16] 孙学凯, 范志平, 王红, 等. 科尔沁沙地复叶槭等 3 个阔叶树种的光合特性及其水分利用效率[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 188-194.
- [17] 白向历, 孙世贤, 杨国航, 等. 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 60-63.