

施硫、控水和施肥对蓝莓叶片叶绿素荧光特性的影响^①

张会慧¹, 周琳², 刘昆¹, 李可心¹, 魏殿文², 张悦^{2*}

(1 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2 黑龙江省科学院自然与生态研究所, 湿地与生态保育国家地方联合工程实验室, 林下经济资源研发与利用协同创新中心, 黑龙江省特色动植物利用工程技术研究中心, 哈尔滨 150040)

摘要: 在我国蓝莓主产区大兴安岭利用正交设计方法研究了施硫、控水和施肥 3 个因素对蓝莓叶片叶绿素荧光特性的影响, 拟确定 3 个因素对蓝莓叶片 PS II 反应中心功能的影响顺序及最佳水平。结果表明: 3 个因素互作对蓝莓叶片叶绿素荧光参数影响显著, 且不同处理下各荧光参数均明显优于对照。极差分析和偏最小二乘回归结果均显示, 3 个因素对蓝莓叶片 PS II 反应中心功能的影响顺序为控水 > 施硫 > 施肥。另外, 偏最小二乘回归方程中的二次项系数结果揭示 3 个因素均存在一个最适宜范围, 当超过这一范围时会起到相反的作用。综合极差分析结果中各因素最优水平可以确定: 施用硫磺 70 ~ 80 g/m², 土壤相对含水率约 45% ~ 60%, 硫酸钾复合肥 5 ~ 7.5 g/株为最适宜我国大兴安岭地区蓝莓“美登”的农艺措施。

关键词: 蓝莓; 正交设计; 硫磺; 控水; 施肥; 叶绿素荧光

中图分类号: S157.3

蓝莓为杜鹃花科(Ericaceae)越橘属(*Vaccinium* spp.)落叶灌木, 果实甜酸适口, 风味独特, 既可鲜食又可加工果酒、果汁和果酱等^[1]。蓝莓果实中含有丰富的花色素苷和维生素等, 具有较高的营养和保健价值^[2-3], 是抗氧化作用最强的水果之一。因此, 蓝莓堪称“世界第三代水果之王”^[4], 是目前保健功能果品的研究热点之一。但是由于蓝莓栽培过程中对生长环境的要求相对较高, 特别是需要相对较低的土壤 pH, 适宜的土壤水分和养分含量等^[5-7]。在蓝莓种植过程中, 为寻求最适宜当地条件的调控技术, 常常进行多因素共同处理, 因此不但要考虑单因素的正效应, 还要考虑多因素之间的耦合或拮抗效应^[8]。由于蓝莓独特的喜酸性土壤特性, 因此, 目前我国蓝莓人工栽培过程中常常采用施硫磺、硫酸铝等一些酸性肥料的方法调控土壤 pH^[9-10]。硫磺在 S 氧化为 SO₄²⁻的过程中可以产生 H⁺ 以达到降低土壤 pH 的目的^[11-12], 并且 SO₄²⁻ 具有改变土壤电荷的性质^[13], 因其成本低、作用效果明显在盐碱地土壤酸碱度改中得到了广泛的应用^[14]。目前已有蓝莓人工种植中施用硫磺促进其生长的报道^[15]。正交设计是研究多因素多水平的一种设计方法, 它是根据正交性从全面试验中挑选出

部分有代表性的点进行试验, 这些有代表性的点具备了“均匀分散, 齐整可比”的特点, 是一种高效、经济的试验设计方法^[16-17]。偏最小二乘回归(PLSR)是一种集多元线性回归分析、典型相关分析和主成分分析等功能于一体的多元统计分析方法, 可以有效克服其他回归方程在自变量间存在多重相关性时导致估计结果误差较大且不稳定等弊端^[18-19]。植物叶片的叶绿素荧光参数是反映植物光合能力的重要指标, 特别在研究光系统功能方面发挥着重要的作用^[20-21]。本研究设计施硫、控水和施肥 3 个试验因素, 每个试验因素设置 4 个梯度水平, 利用正交设计法研究了 3 个因素对蓝莓叶片 PS II 功能的影响, 并利用 PLSR 法进行了不同因素对蓝莓叶片叶绿素荧光参数的数学拟合, 以寻求最优的试验组合, 为蓝莓栽培过程中的综合调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和处理

试验于 2011—2014 年在大兴安岭地区阿木尔林业局中心苗圃蓝莓人工栽培试验示范区进行, 试验地基本土壤理化性质: 碱解氮 305.96 mg/kg、速

基金项目: 国家科技支撑项目(2011BAD08B01-03)资助。

* 通讯作者(zyszy1962@163.com)

作者简介: 张会慧(1986—), 男, 内蒙赤峰人, 讲师, 主要从事植物生理生态学研究。E-mail: xtwfwf@126.com

效磷 19.59 mg/kg、速效钾 149.83 mg/kg、有机质 21.7 g/kg、pH 5.06。供试蓝莓品种为矮丛类“美登”，2011年移栽(移栽苗 3 年生)，试验采用垄作方式，垄长 160 m，垄宽 1.3 m，种植株距 0.6 m，即每垄种植 236 株。

正交试验的 3 个因素分别选取施硫(A)、控水(B)和施肥(C)，每个因素设置 4 个水平，分别以 1、2、3 和 4 表示，具体方案见表 1。其中，以不施硫磺、无灌溉和不施肥为处理 1，即对照(CK)。施硫处理硫磺的施用方式在移栽前撒施，然后 15 cm 深翻混匀，

施用硫磺在 2011 年移栽前施用一次。控水处理是以土壤相对含水率为标准，随时监控各处理 0~20 cm 土层土壤相对含水率，随时采用试验地的喷灌装置进行水分控制，控水试验在 2011—2014 年均按相同梯度进行控制，其中 0 水平为无灌溉措施、无防雨棚的自然生长处理。施肥处理选用的肥料为硫酸钾复合肥，施肥方式采用单株环施法，施肥深度约 10 cm。施肥试验的肥料在 2011—2014 年每年的 6 月施用。本研究于 2014 年 8 月进行叶片叶绿素荧光参数的测定。

表 1 正交处理各因素水平及编号
Table 1 Levels and codes of the experimental factors

处理编号	试验因素及水平代号			试验因素水平		
	A	B	C	A (g/m ²)	B (%)	C(g/株)
1(CK)	1	1	1	0	无灌溉	0
2	1	2	2	0	30~45	5
3	1	3	3	0	45~60	7.5
4	1	4	4	0	≥60	10
5	2	1	3	60	无灌溉	7.5
6	2	2	4	60	30~45	10
7	2	3	1	60	45~60	0
8	2	4	2	60	≥60	5
9	3	1	4	70	无灌溉	10
10	3	2	3	70	30~45	7.5
11	3	3	2	70	45~60	5
12	3	4	1	70	≥60	0
13	4	1	2	80	无灌溉	5
14	4	2	1	80	30~45	0
15	4	3	4	80	45~60	10
16	4	4	3	80	≥60	7.5

1.2 测定项目和方法

叶片叶绿素荧光参数的测定：利用暗适应夹对蓝莓新生枝条上的中部完全展开叶片进行 0.5 h 的暗适应，采用便携式脉冲调制荧光仪 FMS-2(Hansatch 公司，英国)测定初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)和可变荧光(F_v)，以及光适应下的最大荧光(F_m')、光适应下的最小荧光(F_0')及稳态荧光(F_s)，计算 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{PSII})、光化学淬灭系数(q_p)和非光化学淬灭(NPQ)等，其中， $F_v/F_m=(F_m/F_0)/F_m$ ， $\Phi_{PSII}=(F_m'/F_s)/F_m'$ ， $q_p=(F_m'-F_s)/(F_m'-F_0')$ ， $NPQ=(F_m'/F_m)/F_m'^{[22]}$ 。

1.3 数据处理和统计方法

运用 Excel 和 DPS 软件对试验数据进行统计分析，结果中的数据为 3 次重复的平均值±标准差(SE)，

采用最小显著差异法(LSD)进行不同处理结果之间的多重比较。

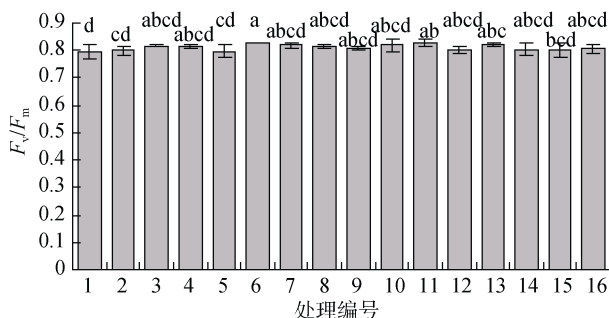
分别计算各叶绿素荧光参数在不同因素和不同水平下的 K 值及极差 R ，其中 K 值即各因素不同水平所对应的试验指标和，由 K 值大小可以判断各因素优水平和优组合。各因素素的极差 $R=\max(K_j)-\min(K)$ ， R 越大，说明该因素对试验指标的影响越大，根据 R 大小，可以判断因素的主次顺序。

利用 DPS 软件中的偏最小二乘回归分析法(PLSR)拟合不同叶绿素荧光参数 $F_v/F_m(y_1)$ 、 $\Phi_{PSII}(y_2)$ 、 $q_p(y_3)$ 和 $NPQ(y_4)$ 与施硫磺量(x_1)、土壤相对含水率(x_2)和施肥量(x_3)3 个因子间的偏最小二乘回归方程，拟合出不同因素互作下蓝莓叶片 PS II 光化学活性最优的因素组合。

2 结果与分析

2.1 叶绿素荧光参数

由图 1 结果可以看出,不同处理下蓝莓叶片的 F_v/F_m 变化幅度相对较小,均维持在 0.8 左右,但处理 2 ~ 16 的 F_v/F_m 均较处理 1(即 CK)有不同程度的增加,其中处理 6、11、13 增加幅度较大,其他处理与 CK 差异不显著,即处理 6、11、13 在一定程度上提高了蓝莓叶片的光化学活性,但不同处理均没有使蓝莓叶片发生光抑制现象。与 F_v/F_m 相比,蓝莓叶片的 Φ_{PSII} 变化幅度较大,说明反映蓝莓叶片的光化学活性方面, Φ_{PSII} 较 F_v/F_m 更具代表性。但同样也表现为 CK 处理 Φ_{PSII} 最低, Φ_{PSII} 相对较低的为处理 5、9 和 16,而 Φ_{PSII} 值相对较高的处理分别为处理 2、3、7、11 和 15,分别较处理 1 增加了 25.03%、23.29%、29.90%、30.77%和 29.14%。



(图中标注的不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 1 施硫、控水和施肥处理下蓝莓叶片的 F_v/F_m 和 Φ_{PSII}
Fig. 1 Effects of sulphur application, water-controlled irrigation and fertilization on F_v/F_m and Φ_{PSII} in leaves of blueberry

由图 2 可以看出,不同处理蓝莓叶片的 q_P 存在较大的变异,但与 CK 相比,其他处理蓝莓叶片的 q_P 均有不同程度的增加,其中增加幅度较小的为处理 9 和处理 16,与 CK 无显著差异,增加幅度相对较大的为处理 7 和处理 15,均显著高于 CK,此时土壤相对含水率均维持在 45% ~ 60%,即土壤水分对蓝莓叶片 q_P 的影响相对较大。与其他叶绿素荧光参数不同,不同处理下蓝莓叶片的 NPQ 与 CK 相比整体呈降低

趋势,但处理 8 和处理 16 与 CK 基本无明显差异,并且处理 9 蓝莓叶片的 NPQ 却较 CK 稍有增加,但未达显著差异水平。其中蓝莓叶片 NPQ 最低的为处理 15,较 CK 降低了 39.84% ($P < 0.05$)。

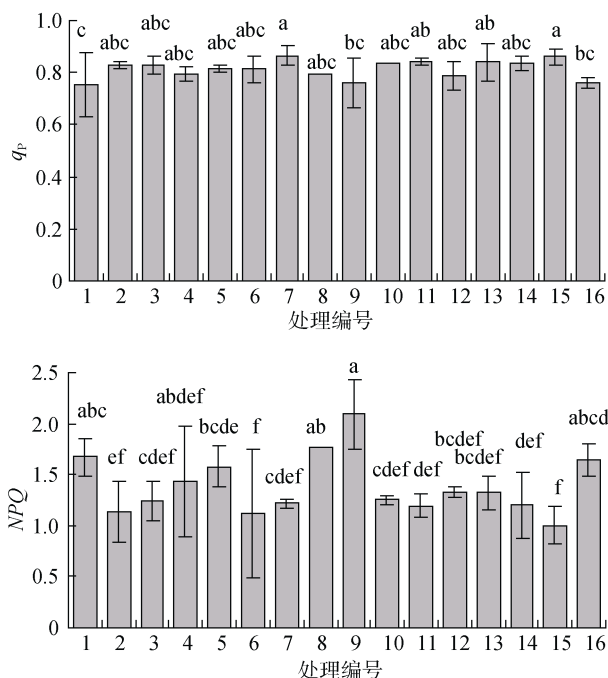


图 2 施硫、控水和施肥处理下蓝莓叶片的 q_P 和 NPQ
Fig. 2 Effects of sulphur application, water-controlled irrigation and fertilization on q_P and NPQ in leaves of blueberry

2.2 极差分析

表 2 显示了各因素交互下蓝莓叶片叶绿素荧光参数的 K 值及其极差结果。从表 2 中可以看出,各因素对 4 个叶绿素荧光参数影响顺序均表现为控水(B) > 施硫(A) > 施肥(C),即对蓝莓叶片各叶绿素荧光参数影响最大的因素均为 B(控水,即土壤相对含水率),次要因素为施硫磺量,而施肥量对蓝莓叶片叶绿素荧光参数的影响最小。 K 值分析结果表明, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 NPQ 均在 A 因素为水平 3 时 K 值最大, q_P 为 A 因素为水平 4 时 K 值最大,各参数均在 B 因素为水平 3 时 K 值最大,除 NPQ 在 C 因素为水平 3 时 K 值达最大值外, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_P 均在 C 因素为水平 2 时达最大 K 值,即 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 的最优组合为 A3B3C2, q_P 的最优组合为 A4B3C2, NPQ 的最优组合为 A3B3C3。

2.3 偏最小二乘回归分析

为进一步明确不同因素的最佳水平,分别建立了叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_P 和 NPQ (分别以 y_1 、 y_2 、 y_3 和 y_4 表示)与施硫磺量(x_1)、土壤相对含水率(x_2)和施肥量(x_3)之间的偏最小二乘回归数学方程。通过方程(1)~(4)可以看出,各方程的常数项均与各叶绿素

表 2 多因素处理下蓝莓叶片叶绿素荧光参数的极差分析
Table 2 Range analysis of chlorophyll fluorescence parameters in leaves of blueberry under different treatments

叶绿素荧光参数		试验因素			
		A (g/m ²)	B (%)	C(g/株)	因素影响顺序及最优组合
F_v/F_m	K_1	3.23	3.22	3.22	B>A>C A3B3C2
	K_2	3.26	3.25	3.26	
	K_3	3.28	3.28	3.24	
	K_4	3.23	3.24	3.25	
	极差 R	0.05	0.06	0.04	
	最佳水平	3	3	2	
Φ_{PSII}	K_1	2.16	1.99	2.15	B>A>C A3B3C2
	K_2	2.20	2.28	2.27	
	K_3	2.31	2.37	2.13	
	K_4	2.20	2.12	2.21	
	极差 R	0.15	0.38	0.14	
	最佳水平	3	3	2	
q_P	K_1	3.20	3.17	3.24	B>A>C A4B3C2
	K_2	3.28	3.31	3.30	
	K_3	3.23	3.40	3.24	
	K_4	3.30	3.14	3.23	
	极差 R	0.10	0.26	0.07	
	最佳水平	4	3	2	
NPQ	K_1	5.49	6.66	5.42	B>A>C A3B3C3
	K_2	5.68	4.71	5.41	
	K_3	5.87	6.67	5.71	
	K_4	5.16	6.17	5.66	
	极差 R	0.71	1.96	0.30	
	最佳水平	3	3	3	

荧光参数的基准值接近,因此,方程的拟合效果相对较好。 y_1 、 y_2 和 y_3 3个方程中的 x_1 、 x_2 和 x_3 一次项系数均为正值, y_4 方程中的 x_1 、 x_2 和 x_3 一次项系数均为负值,说明3个因素对 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_P 的影响均为正效应,而对 NPQ 的影响为负效应。并且 y_1 、 y_2 和 y_3 3个方程中的一次项系数以及 y_4 方程中一次项系数绝对值均表现为 $x_2>x_1>x_3$,即土壤相对含水率对各叶绿素荧光参数的影响最大,其次为施用硫磺量,施肥量对叶绿素荧光参数的影响最小。 y_1 、 y_2 和 y_3 3个方程中的 x_1 、 x_2 和 x_3 二次项系数均为负值,而 y_4 方程中的 x_1 、 x_2 和 x_3 二次项系数均为正值,说明3个因素对 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_P 的影响均有一个适宜范围,当超过这一范围时会起到相反的作用,而对于 y_4 即 NPQ 则表现为随着各单因素值的增加,蓝莓叶片 NPQ 持续增加。单因素互作结果表明, y_1 、 y_2 和 y_3 3个方程中的 x_1x_2 和 x_1x_3 项系数均为负值,即施用硫磺和土壤相对含水率以及施用硫磺和施肥之间存在一定的拮抗效应,而 x_2x_3 项系数为正值,即土壤相

对含水率和施肥量之间存在促进效应,同样, y_4 方程中各因素互作效应的变化趋势也与 y_1 、 y_2 和 y_3 3个方程相反。

$$y_1=0.7560531+0.010623x_1+0.031699x_2+0.006040x_3-0.000395x_1^2-0.005176x_2^2-0.000596x_3^2-0.001926x_1x_2-0.001260x_1x_3+0.000042x_2x_3$$

(1)

$$y_2=0.2328971+0.060817x_1+0.181473x_2+0.034577x_3-0.002261x_1^2-0.029629x_2^2-0.003411x_3^2-0.011027x_1x_2-0.007213x_1x_3+0.000240x_2x_3$$

(2)

$$y_3=0.5957751+0.041945x_1+0.125160x_2+0.023847x_3-0.001559x_1^2-0.020435x_2^2-0.002353x_3^2-0.007605x_1x_2-0.004975x_1x_3+0.000166x_2x_3$$

(3)

$$y_4=3.0090411-0.313113x_1-0.934299x_2-0.178016x_3+0.011641x_1^2+0.152541x_2^2+0.017561x_3^2+0.056769x_1x_2+0.037134x_1x_3-0.001236x_2x_3$$

(4)

3 讨论

植物叶片的叶绿素荧光特性是反映植物光合能力的重要指标,特别是在反映植物光能的吸收、利用以及PS II反应中心光化学活性方面发挥着重要的作用^[23]。本研究中,不同因素正交处理下蓝莓叶片的

F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 均较处理 1(CK)有不同程度的增加,说明施硫、控水和施肥 3 个因素互作均可以提高蓝莓叶片的 PS II 光化学活性,而不同处理下蓝莓叶片的 NPQ 整体较 CK 呈降低趋势,即 3 个因素正交处理可以降低蓝莓叶片吸收光能以无效热能形式的耗散,保证光化学反应中正常的能量供应。不同处理下蓝莓叶片的 F_v/F_m 均维持在 0.8 左右,没有大幅度变化, F_v/F_m 是反映 PS II 光抑制的重要指标,这说明不同处理下蓝莓叶片仅存在光化学活性方面的差异,并没有明显光抑制现象的发生。整体来看,不同处理下蓝莓叶片 PS II 光化学活性相对较低的为处理 9 即施用硫磺 70 g/m²、不进行灌溉和施肥 10 g/株,其原因可能是由于在土壤含水量较低时,施肥量的增加使土壤水势进一步降低,导致植物吸收水分更加困难^[24-25],进而导致蓝莓的光合能力受到限制,并且此时施用硫磺量可能未达到蓝莓生长所需的最适 pH。处理 9 蓝莓叶片的 NPQ 较 CK 稍有增加, NPQ 虽与光化学反应竞争能量,但在逆境下 NPQ 的增加可以有效耗散过剩光能,以免 PS II 反应中心受过剩光能的破坏^[26-27]。施用硫磺会通过降低土壤的 pH 而影响养分的有效性,在一定程度上促进蓝莓根际土壤酶的活性,提高土壤养分的活化^[28],这与施肥的作用相似,但这也降低土壤水势,因此处理 9 蓝莓叶片 NPQ 增加可能是在无灌溉和施硫及施肥等因素共同作用导致土壤水势降低时蓝莓叶片启动了热耗散机制进行过剩光能的利用,这也是此时蓝莓叶片没有发生光抑制的重要原因。不同处理下蓝莓叶片 PS II 光化学活性相对较高的为处理 7 和处理 15 等,即保证适宜的土壤相对含水率、合理施用硫磺和施肥,这也说明不同因素之间存在明显的耦合效应。

但本研究中不同参数的变化趋势并不完全一致。因此,为选择最适宜的互作条件,有必要对不同因素影响顺序和不同因素最佳水平进行综合考虑。极差分析结果中 R 值可以判断各因素的主次顺序,而 K 值则判断各因素的最优水平和最优组合^[29]。本研究结果表明,3 个因素对 4 个叶绿素荧光参数的极差 R 值均表现为 $B>A>C$,即对蓝莓叶片各叶绿素荧光参数影响最大的因素均为 B(土壤相对含水率),次要因素为施硫磺量,而施肥量对蓝莓叶片叶绿素荧光参数的影响最小。通过建立的偏最小二乘回归方程可以看出, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 方程中土壤相对含水率(x_2)的一次项系数以及 NPQ 的 x_2 一次项系数绝对值也明显大于施硫磺量(x_1)和施肥量(x_3)的一次项系数,这同样说明土壤相对含水率为影响蓝莓叶片 PS II 反应中心光化学活性的第一因素,而施用硫磺对蓝莓叶片

PS II 反应中心光化学活性的影响程度大于施肥,这与极差 R 值的结果相符。 K 值分析结果表明,各参数的 A 因素最佳水平为 3 或 4, B 因素最佳水平为 3,而 C 因素的最佳水平为 2 或 3,均不是在各因素的最高水平使蓝莓叶片 PS II 反应中心光化学活性达最大值,即各因素均的最佳水平均有一个明显的极限值,通过 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 的偏最小二乘回归方程中各因变量 x_1 、 x_2 和 x_3 的二次项系数均为负值也可以说明 3 个因素对蓝莓叶片 PS II 反应中心光化学活性的正效应均存在一个适宜范围,当超过这一范围时会起到相反的作用。偏最小二乘回归方程中目标函数值 0.86 的 x_1 、 x_2 和 x_3 因素最优水平分别为 4、2.3 和 1.7,即施用硫磺 80 g/m²、土壤相对含水率约 45%~60%,施肥量在 5~7.5 g/株,这与极差分析中 R 值结果基本相符。

4 结论

施硫、控水和施肥 3 个因素互作对蓝莓叶片叶绿素荧光参数影响显著,并均在不同程度上提高了蓝莓叶片的 PS II 反应中心光化学活性。3 个因素中,土壤相对含水率是影响蓝莓叶片 PS II 反应中功能的第一因素,其次为施用硫磺量,影响最小的为施肥,并且不同因素的正效应均有一个适宜范围。结合极差分析和偏最小二乘回归结果,我国大兴安岭地区蓝莓 PS II 反应中心最优的农艺措施建议为施用硫磺 70~80 g/m²、土壤相对含水率约 45%~60%,施肥量在 5~7.5 g/株。

参考文献:

- [1] 刘萌, 范新光, 王美兰, 等. 不同包装方法对蓝莓采后生理及贮藏效果的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(14): 46-50
- [2] 韩斯, 孟宪军, 汪艳群, 等. 不同品种蓝莓品质特性及聚类分析[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 140-144
- [3] 李铁军, 朴炫春, 廉家盛, 等. 利用生物反应器接触培养法增殖笃斯越橘丛生苗[J]. 林业科学, 2012, 48(11): 130-133
- [4] 胡雅馨, 李京, 惠伯棣. 蓝莓果实中主要营养及花青素成分的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(10): 600-603
- [5] 唐雪东, 李亚东, 臧俊华, 等. 土壤施硫对越橘生长发育的影响[J]. 东北农业大学学报, 2004, 35(5): 553-560
- [6] 唐雪东, 李亚东, 丁绍文, 等. 不同基质和硫磺粉对越橘土壤和叶片矿质营养的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29(3): 279-283
- [7] 陈文荣, 曾玮玮, 李云霞, 等. 高丛蓝莓对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性综合评价[J]. 园艺学报, 2012, 39(4): 637-646
- [8] 陈文荣, 曾玮玮, 李云霞, 等. 高丛蓝莓对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性综合评价[J]. 园艺学报, 2012, 39(4): 637-646

- [9] 李亚东, 吴林, 等. 土壤改良对越桔(*Vaccinium*)某些生理指标的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(6): 419–422
- [10] 王宇, 韩兴, 赵兰坡, 等. 硫酸铝对苏打盐碱土的改良作用研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 50–53
- [11] Trevett M F, Durgin R E. Regulating soil acidity in lowbush blueberry fields[J]. Res. Life Sci., 1971(5): 38–45
- [12] 孟天竹, 朱同彬, 张金波, 蔡祖聪. 强还原处理中 pH 对硫酸根去除效果及产物的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 117–122
- [13] 邹献中, 陈勇, 刘辉, 等. 硫酸根离子添加顺序对可变电荷土壤吸附铜离子的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 860–867
- [14] 白亚妮, 来航线, 温小玲, 等. 硫磺改良盐碱土的微生物效应研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 153–157
- [15] 李亚东, 吴林, 孙晓秋, 等. 施硫对土壤 pH、越桔树体生长营养的影响[J]. 吉林农业大学学报, 1995, 17(2): 49–53
- [16] 李慧芬, 林雁冰, 王娜娜, 等. 一株 Zn 抗性菌株的筛选鉴定及吸附条件优化[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2 189–2 196
- [17] 陈惠, 马涌航, 胡彦周, 等. 正交设计优化羊肉胴体冲洗工艺条件研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(27): 282–287
- [18] 杨杰, 方俊, 胡德秀, 等. 偏最小二乘法回归在水利工程安全监测中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 136–140
- [19] 刘燕德, 熊松盛, 吴至境, 等. 赣南脐橙园土壤全磷和全钾近红外光谱检测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 156–162
- [20] 张会慧, 张秀丽, 李鑫, 等. NaCl 和 Na₂CO₃ 胁迫对桑树幼苗生长和光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 625–631
- [21] 张会慧, 张秀丽, 王娟, 等. 利用快相叶绿素荧光参数综合评价 3 种丁香耐盐性[J]. 南京林业大学学报, 2013, 37(5): 13–19
- [22] 张会慧, 张秀丽, 胡彦波, 等. 中碱钠盐胁迫对桑树幼苗生长及光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报, 2013, 37(1): 217–222
- [23] Chen L S, Li P, Cheng L. Effects of high temperature coupled with high light on the balance between photooxidation and photoprotection in the sun-exposed peel of apple[J]. Planta, 2008, 228: 745–756
- [24] 孙誉育, 唐波, 尹春英, 等. 水-氮耦合效应对红桦幼苗生长的影响及其生理机制[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(04): 1–9
- [25] 刘锁云, 陈磊庆, 胡廷会, 李立军, 刘景辉. 水氮耦合对燕麦光合特性的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(1): 60–67
- [26] Goss R, Böhm K, Wihelm C. The xanthophyll cycle of *Mantoniella squamata* converts violaxanthin into antheraxanthin but not to zeaxanthin: consequences for the mechanism of enhanced non-photochemical energy dissipation[J]. Planta, 1998, 205: 613–621
- [27] Li X P, Bjorkman O, Shi C, et al. A pigment-binding protein essential for regulation of photosynthetic light harvesting[J]. Nature, 2000, 403: 391–395
- [28] 唐雪东, 李亚东, 刘海广, 等. 施用硫磺粉对越橘根域土壤酶活性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(2): 183–187
- [29] 郭雅妮, 赵婷, 同帆, 等. PVA 降解菌的复配组合及其紫外诱变处理的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(7): 1 669–1 674

Sulphur Application, Water-controlled Irrigation and Fertilization on Chlorophyll Fluorescence Parameters in Leaves of Blueberry

ZHANG Huihui¹, ZHOU Lin², LIU Kun¹, LI Kexin¹, WEI Dianwen², ZHANG Yue^{2*}

(1 College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2 Natural Resources and Ecology Institute, National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Collaborative Innovation Center for Development and Utilization of Forest Resource, Characteristic Animal and Plant Utilization Engineering Technology Research Center of Heilongjiang Province, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China)

Abstract: The effects of sulphur powder application, water-controlled irrigation and fertilization on chlorophyll fluorescence parameters in leaves of blueberry were investigated using orthogonal design. The main objective was to identify the order of the three factors and the best level on PS_{II} reaction center function in leaves of blueberry. The results showed that PS_{II} reaction center function in leaves of blueberry was affected by the three factors obviously, and the fluorescence parameters under different treatments were significantly better than that of control. Range analysis and partial least squares regression showed that the effects of the three factors on PS_{II} reaction center function in leaves of blueberry followed the order: water-controlled irrigation> application of sulphur powder>fertilization. In addition, quadratic term coefficient of partial least squares regression equation showed that the three factors had the most suitable range. The opposite effect occurred out of this suitable range. Comprehensive analysis suggested that the best agronomic measures in the Greater khingan mountain area of China are: 70–80 g/m² of sulfur powder, soil relative water content at 45%–60%, potassium sulphate fertilizer of 5–7.5 g/plant.

Key words: Blueberry; Orthogonal design; Sulphur; Water-controlled irrigation; Fertilization; Chlorophyll fluorescence