

水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率*

刘小刚¹ 张 岩¹ 程金焕² 钟 原¹ 杨启良¹

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650550; 2. 云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所, 保山 678025)

摘要: 为探明经济热作小粒咖啡幼树的水氮精准管理模式,研究了4个灌水水平(W_s , 75%~85%田间持水量; W_H , 65%~75%田间持水量; W_M , 55%~65%田间持水量; W_L , 45%~55%田间持水量)和4个施氮水平(N_H , 0.60 g/kg; N_M , 0.40 g/kg; N_L , 0.20 g/kg; N_Z , 0 g/kg)对小粒咖啡幼树生理特性及水氮吸收利用的影响。结果表明:与 W_L 相比,增加灌水使叶绿素、类胡萝卜素、丙二醛、脯氨酸和可溶性糖含量分别降低5.8%~15.5%、6.0%~14.4%、14.2%~30.3%、27.6%~60.0%和22.6%~57.5%,使根系活力和水分利用效率分别提高15.8%~63.8%和21.6%~29.6%,降低土壤硝态氮均值21.5%~36.2%。与 N_Z 相比,增加施氮使丙二醛降低23.8%~49.8%,叶绿素、类胡萝卜素、脯氨酸、可溶性糖、根系活力和水分利用效率分别提高49.0%~88.4%、21.9%~60.9%、509%~703%、20.7%~52.3%、23.5%~41.8%和21.6%~53.9%,同时土壤硝态氮均值增加2.73~14.44倍。 N_Z 和 N_L 时氮素吸收总量与灌水量显著正相关; N_M 和 N_H 时水分利用效率和氮素吸收总量均随灌水量先增后减。不同灌水条件下,水分利用效率、氮素吸收总量均与施氮量呈显著二次曲线关系。 $N_M W_H$ 组合的水分利用效率最大,同时 N_M 和 N_H 处理的氮素表观利用效率和氮素吸收效率最大,因此 $N_M W_H$ 为水氮高效利用组合。

关键词: 小粒咖啡 水氮耦合 生理特性 水氮利用

中图分类号: S311; S571.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0160-07

引言

咖啡豆分小粒种、中粒种和大粒种,全世界小粒种的种植面积和产量占80%以上。我国云南是小粒种咖啡的主产区,但云南小粒咖啡种植区90%的降水集中在6~10月份,而在开花结果期(3~5月份)土壤水分极度亏缺^[1];同时小粒咖啡种植以山坡地为主,土壤肥力较低。季节性干旱和土壤贫瘠是制约我国小粒咖啡优质高产的两大因素^[1-2]。单纯施肥和灌水往往不能有效改善林木的生长状况,应将二者综合考虑^[3]。研究发现,采取合理的水肥管理措施可显著改善矮化红富士幼树的营养状况,促进新梢生长和提早开花结实^[4-5]。不同水肥组合对橡胶产量和干胶含量影响显著,氮肥与土壤水分、磷肥及钾肥之间存在耦合效应^[6]。氮肥对洋白蜡生物量的作用在很大程度上受土壤水分的影响,不同水肥配合的生物量积累不同^[7]。土壤水分是影响毛白杨生物量的主要因素,其次为氮肥和磷肥。随着三者投入量的增加,毛白杨生物量增加;当三者增加到一定程度时,继续投入则使其生物量下降^[8]。前人对小粒咖啡生长的水肥耦合效应也作

了初步探索^[1-2,9-10],而有关水氮耦合对小粒咖啡生长及水氮利用方面的研究还鲜见报道。

水氮是容易调控的两大生态因子,适宜的水氮供给也是植物健康生长的前提^[11]。研究水氮耦合效应有助于制定合理的水氮供应模式,提高水氮利用效率^[12]。本文研究不同水氮组合对小粒咖啡幼树生理特性、根区水氮迁移累积和水氮吸收利用的影响,以为小粒咖啡幼树的水氮高效管理提供一定的理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2012年4~12月份在昆明理工大学智能控制温室内完成,温度为12~35℃,湿度为50%~85%。4月12日移栽龄期为1年且生长均一的小粒咖啡幼树(卡蒂姆 P7963,云南潞江坝)到生长盆(上底直径30 cm,下底直径22.5 cm,高30 cm)中,盆底均匀分布5个直径为0.5 cm的小孔保证根区通气良好。供试土壤为燥红壤土,田间持水量为24.3%,土壤粒径0~0.02 mm的颗粒占7.8%,0.02~0.10 mm颗粒占32.4%,0.10~0.25 mm颗

收稿日期: 2014-04-05 修回日期: 2014-04-25

* 国家自然科学基金资助项目(51109102, 51379004)和云南省应用基础研究资助项目(2010ZC043, 2013FB024, KKS201223076)

作者简介: 刘小刚,副教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: liuxiaogang888@tom.com

粒占 45.4% ,0.25 ~ 1.00 mm 颗粒占 13.4% 。土壤有机质质量比 5.05 g/kg,全氮质量比 0.87 g/kg,全磷质量比 0.68 g/kg,全钾质量比 13.9 g/kg。每盆装土 14 kg,装土容重为 1.2 g/cm³。

1.2 试验设计

试验设 2 个因素:灌水和氮肥。4 个灌水水平,分别为充分灌水 (W_s , 75% ~ 85% 田间持水量)、高水 (W_H , 65% ~ 75% 田间持水量)、中水 (W_M , 55% ~ 65% 田间持水量)和低水 (W_L , 45% ~ 55% 田间持水量)。4 个施氮水平,分别为高氮 (N_H , 0.60 g/kg)、中氮 (N_M , 0.40 g/kg)、低氮 (N_L , 0.20 g/kg)和无氮 (N_Z , 0 g/kg)。磷肥和钾肥施入水平为 0.5 g/kg。完全组合设计,共 16 个处理,4 次重复。称量法控制灌水,灌水处理前各处理土壤含水率控制在田间持水量的 75% ~ 85%,缓苗后 50 d 后开始灌水处理。试验于灌水处理后 192 d 结束。每 7 d 调换植株位置 1 次,以减少环境造成的系统误差。

1.3 测定项目及方法

分别在试验前期、中期和后期(7-9、9-26 和 12-5)采集小粒咖啡根区土样,测定土壤硝态氮。土壤硝态氮采用 1 mol/L 的 KCl(土液质量比 1:5)浸提,紫外可见分光光度计测定^[13]。叶片生理指标于 10 月 20 日(旺长期灌水前 1 d)取冠层顶部第 1 片完全展开叶测定^[14],根系活力于 12 月 6 日测定。叶片水分、叶绿素和类胡萝卜素含量、脯氨酸含量、丙二醛含量、可溶性糖含量及根系活力分别采用称

量法、乙醇提取比色法、酸性茚三酮法、硫代巴比妥酸比色法、蒽酮比色法和 TTC 还原法测定^[15]。试验结束时将植株不同器官分开,105℃ 杀青 30 min 后 80℃ 干燥至恒质量,用天平测定其干质量,凯氏定氮法测定氮素含量^[13]。

总耗水量由水量平衡方程计算,水分利用效率为总干物质量与总耗水量比值。氮素吸收总量为植株各器官氮素质量分数与其干物质量(单位:g/株)乘积总和。氮素干物质生产效率为总干物质量与植株氮素吸收总量的比值^[16]。氮素表观利用效率为施氮处理的氮素吸收量减去未施氮处理的氮素吸收量再与施氮量的比值^[17]。氮素吸收效率为植株氮素吸收总量与施氮量的比值^[18]。

1.4 数据处理

采用 SAS 统计软件对数据进行方差分析(ANOVA)和多重比较,多重比较采用 Duncan 法进行。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对小粒咖啡幼树生理特性的影响

灌水和氮素及其交互作用对小粒咖啡各生理指标影响显著(表 1)。与 W_L 处理相比,增加灌水使叶绿素、类胡萝卜素、丙二醛、脯氨酸和可溶性糖分别降低 5.8% ~ 15.5%、6.0% ~ 14.4%、14.2% ~ 30.3%、27.6% ~ 60.0% 和 22.6% ~ 57.5%,而使根系活力增加 15.8% ~ 63.8%。与 N_Z 相比,增加施氮使叶绿素、类胡萝卜素、脯氨酸、可溶性糖和根系

表 1 水氮耦合对小粒咖啡幼树生理特性的影响

Tab.1 Water-nitrogen coupling effect on physiological characteristic of young arabica coffee tree							
氮素水平	灌水水平	叶绿素质量比/ (mg·g ⁻¹)	类胡萝卜素质量 比/(mg·g ⁻¹)	丙二醛摩尔质量 浓度/(nmol·g ⁻¹)	脯氨酸质量比/ (μg·g ⁻¹)	可溶性糖质量 分数/%	根系活力/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
N_H	W_s	16.83 ± 0.15 ^c	2.47 ± 0.03 ^c	4.11 ± 0.51 ^c	23.38 ± 1.83 ^d	27.27 ± 1.45 ^h	86.90 ± 4.19 ^a
	W_H	17.51 ± 0.72 ^b	2.57 ± 0.10 ^b	5.03 ± 0.43 ^c	50.27 ± 2.12 ^c	34.75 ± 1.18 ^g	71.58 ± 4.52 ^a
	W_M	17.96 ± 0.57 ^b	2.72 ± 0.07 ^b	5.14 ± 0.12 ^b	57.06 ± 3.13 ^b	39.54 ± 4.39 ^f	64.65 ± 0.65 ^b
	W_L	18.07 ± 0.84 ^a	2.81 ± 0.06 ^a	5.63 ± 0.11 ^a	69.95 ± 2.56 ^a	48.81 ± 4.98 ^e	52.55 ± 3.06 ^c
N_M	W_s	15.03 ± 0.11 ^f	2.17 ± 0.05 ^f	4.82 ± 0.48 ^c	25.54 ± 2.03 ^b	26.41 ± 3.09 ^d	86.10 ± 6.61 ^d
	W_H	15.94 ± 0.36 ^e	2.34 ± 0.06 ^e	4.20 ± 0.21 ^c	27.05 ± 2.84 ^g	36.57 ± 4.19 ^c	86.53 ± 2.53 ^d
	W_M	16.58 ± 0.02 ^e	2.42 ± 0.08 ^e	5.16 ± 0.41 ^b	40.34 ± 2.25 ^f	47.41 ± 5.08 ^b	70.74 ± 2.29 ^e
	W_L	16.94 ± 0.20 ^d	2.47 ± 0.06 ^d	5.14 ± 0.09 ^a	59.31 ± 4.75 ^e	65.74 ± 0.90 ^a	57.23 ± 2.26 ^f
N_L	W_s	13.99 ± 0.08 ⁱ	2.10 ± 0.08 ⁱ	6.76 ± 0.19 ^f	25.37 ± 1.89 ^b	25.35 ± 1.11 ^d	80.61 ± 2.74 ^a
	W_H	14.12 ± 0.34 ^h	2.05 ± 0.04 ^h	6.07 ± 0.94 ^f	35.09 ± 0.16 ^g	46.31 ± 2.42 ^e	72.55 ± 7.26 ^a
	W_M	13.74 ± 0.32 ^h	1.94 ± 0.05 ^h	6.58 ± 0.25 ^e	39.18 ± 0.67 ^f	50.35 ± 5.41 ^b	59.81 ± 7.74 ^b
	W_L	13.78 ± 0.21 ^g	1.92 ± 0.03 ^g	9.90 ± 0.31 ^d	53.94 ± 1.56 ^e	67.68 ± 1.40 ^a	48.68 ± 0.81 ^c
N_Z	W_s	6.17 ± 0.07 ^l	1.26 ± 0.13 ^l	6.76 ± 0.19 ⁱ	3.97 ± 0.69 ^l	16.79 ± 0.25 ^l	64.97 ± 6.78 ^g
	W_H	8.72 ± 0.29 ^k	1.47 ± 0.04 ^k	9.39 ± 0.54 ⁱ	3.31 ± 1.02 ^k	27.00 ± 2.10 ^k	74.97 ± 6.45 ^g
	W_M	9.71 ± 0.07 ^k	1.70 ± 0.10 ^k	10.77 ± 0.19 ^h	5.10 ± 1.32 ^j	37.38 ± 1.22 ^j	35.94 ± 0.16 ^h
	W_L	12.75 ± 0.06 ^j	2.14 ± 0.07 ^j	11.55 ± 0.56 ^g	12.60 ± 1.70 ⁱ	43.41 ± 2.65 ⁱ	36.05 ± 2.37 ⁱ

注:数据为平均值(n=4),同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05),下同。

活力分别提高 49.0% ~ 88.4%、21.9% ~ 60.9%、509% ~ 703%、20.7% ~ 52.3% 和 23.5% ~ 41.8%，而使丙二醛降低 23.8% ~ 49.8%。可溶性糖和根系活力随施氮量的增加先增后降， N_M 处理的最高。与 $N_Z W_L$ 相比，除 N_Z 处理外，其余各处理使叶绿素和脯氨酸分别提高 8.1% ~ 41.7% 和 85.5% ~ 327.9%； N_M 和 N_H 各处理提高类胡萝卜素 9.7% ~ 31.5%。与 $N_Z W_L$ 相比，增加水氮供给丙二醛降低 6.8% ~ 63.6%；除 $N_Z W_M$ 处理对根系活力影响不明显外，其余处理提高根系活力 35.0% ~ 141.1%。

2.2 水氮耦合对根区硝态氮累积的影响

统计表明，灌水和氮素及其交互作用对小粒咖啡根区土壤硝态氮含量影响显著（图 1）。与 W_L 相

比，增加灌水使第 1 次、第 2 次、第 3 次硝态氮测量值及土壤硝态氮均值分别降低 11.1% ~ 17.2%、21.4% ~ 49.0%、37.6% ~ 52.4% 和 21.5% ~ 36.2%。随着灌水和植株对氮素的吸收利用，土壤硝态氮含量明显降低。与 N_Z 相比，增加施氮使第 1 次、第 2 次、第 3 次硝态氮测量值及土壤硝态氮均值分别提高 4.78 ~ 20.13 倍、1.51 ~ 11.76 倍、1.88 ~ 11.23 倍和 2.73 ~ 14.44 倍。与 $N_Z W_L$ 处理相比，除 $N_Z W_M$ 处理外，其余各处理分别提高第 1 次、第 2 次、第 3 次硝态氮测量值和土壤硝态氮均值的 2.16 ~ 48.12 倍、2.34 ~ 34.97 倍、2.30 ~ 38.43 倍和 2.27 ~ 40.55 倍。总之，随着时间的推移，各处理土壤硝态氮含量明显下降，降幅与灌水水平正相关。

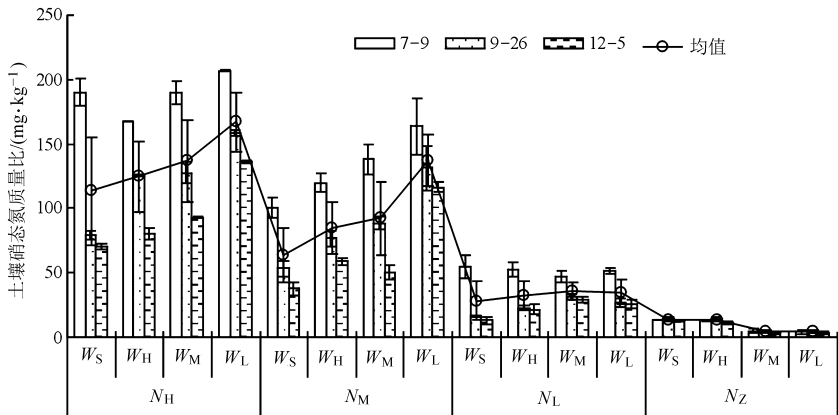


图 1 水氮耦合对小粒咖啡幼树根区土壤硝态氮含量的影响

Fig. 1 Water-nitrogen coupling effect on soil NO_3^- -N content in rootzone of young arabica coffee tree

2.3 水氮耦合对水分和氮素利用效率的影响

灌水和氮素及其交互作用对小粒咖啡水分利用效率、氮素吸收总量、氮素干物质生产效率、氮素表观利用效率及氮素吸收效率影响显著（表 2）。与 W_L 相比，增加灌水使水分利用效率、氮素吸收总量、氮素干物质生产效率、氮素表观利用效率和氮素吸收效率分别提高 21.6% ~ 29.6%、54.1% ~ 90.0%、6.0% ~ 22.6%、151% ~ 209% 和 66.0% ~ 105.6%，这表明增加灌水能促进植株的水氮吸收利用。与 N_Z 相比，增施氮肥使水分利用效率和氮素吸收总量分别提高 21.6% ~ 53.9% 和 126% ~ 192%，而氮素干物质生产效率降低 44.0% ~ 56.4%。与 N_L 相比， N_M 处理氮素表观利用效率和氮素吸收效率分别降低 38.4% 和 43.5%， N_H 使二者分别降低为 49.5% 和 57.1%。表明施氮虽然增加了氮素吸收总量，但降低了氮素吸收效率。与 $N_Z W_L$ 相比，除 $N_Z W_M$ 提高氮素吸收总量不明显外，其余处理氮素吸收总量增加 29.2% ~ 333.6%；除 $N_Z W_M$ 、 $N_Z W_H$ 和 $N_Z W_S$ 外，其余处理氮素干物质生产效率降低 32.1% ~ 58.9%。与 $N_L W_L$ 相比，除 $N_M W_L$ 和 $N_H W_L$ 外，其余

处理氮素表观利用效率提高 32.1% ~ 265.0%。 N_L 时氮素吸收效率随灌水水平的提高而提高； N_M 时 W_L 的氮素吸收效率降低 45.1%， W_S 和 W_H 的氮素吸收效率分别增加 11.5% 和 14.4%； N_H 时各处理氮素吸收效率降低 7.8% ~ 51.4%。表明氮肥供给水平较低时，增加灌水能提高氮素吸收效率；而氮肥供给水平较高则抑制氮素吸收效率。

2.4 小粒咖啡的水氮利用关系

统计分析表明（表 3）， N_Z 时氮素吸收总量与灌水量显著正相关， N_L 时水分利用效率和氮素吸收总量均与灌水量显著正相关， N_M 和 N_H 时水分利用效率和氮素吸收总量均与灌水量呈显著二次曲线关系，氮素表观利用效率与灌水量显著正相关。不同灌水条件下，水分利用效率和氮素吸收总量均与施氮量呈显著二次曲线关系，氮素表观利用效率与施氮量显著负相关。

3 讨论

水分和养分胁迫时，植株通过叶面积、根冠比、质膜透性、内渗透调节物质和酶活性等生理生态指

表 2 水氮耦合对小粒咖啡幼树水氮利用效率的影响

Tab.2 Water-nitrogen coupling effect on water and nitrogen use efficiency of young arabica coffee tree						
氮素水平	灌水水平	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	氮素吸收总量/ (g·株 ⁻¹)	氮素干物质生产 ^a 效率	氮素表观利用 效率/%	氮素吸收效率/ %
<i>N_H</i>	<i>W_S</i>	2.86 ± 0.14 ^a	2.18 ± 0.11 ^a	45.43 ± 0.37 ^m	25.49 ± 1.25 ^a	36.31 ± 1.92 ^a
	<i>W_H</i>	2.55 ± 0.11 ^{ab}	1.80 ± 0.16 ^b	39.99 ± 0.62 ⁿ	18.85 ± 2.22 ^b	29.97 ± 2.66 ^b
	<i>W_M</i>	2.63 ± 0.26 ^b	1.70 ± 0.22 ^c	36.93 ± 1.11 ^o	19.62 ± 3.00 ^b	28.27 ± 3.64 ^c
	<i>W_L</i>	2.02 ± 0.06 ^c	1.15 ± 0.05 ^d	33.65 ± 0.74 ^p	10.76 ± 0.76 ^c	19.13 ± 0.86 ^d
<i>N_M</i>	<i>W_S</i>	2.71 ± 0.15 ^a	1.76 ± 0.12 ^e	52.76 ± 0.42 ⁱ	27.67 ± 1.64 ^a	43.91 ± 2.88 ^e
	<i>W_H</i>	2.95 ± 0.10 ^{ab}	1.80 ± 0.05 ^f	44.68 ± 0.42 ^j	28.38 ± 0.54 ^b	45.07 ± 1.22 ^f
	<i>W_M</i>	2.79 ± 0.05 ^b	1.56 ± 0.02 ^g	42.93 ± 0.37 ^k	25.98 ± 1.42 ^b	38.97 ± 0.46 ^g
	<i>W_L</i>	2.11 ± 0.14 ^c	0.86 ± 0.09 ^h	42.12 ± 0.40 ^l	9.06 ± 2.81 ^c	21.62 ± 2.24 ^h
<i>N_L</i>	<i>W_S</i>	2.42 ± 0.04 ^e	1.69 ± 0.04 ⁱ	55.58 ± 0.48 ^e	52.09 ± 4.53 ^d	84.56 ± 2.22 ⁱ
	<i>W_H</i>	2.18 ± 0.13 ^{ef}	1.50 ± 0.14 ^j	49.33 ± 1.26 ^f	41.60 ± 5.55 ^e	74.97 ± 7.06 ^j
	<i>W_M</i>	2.07 ± 0.07 ^f	1.32 ± 0.05 ^k	47.71 ± 0.47 ^g	39.85 ± 3.72 ^e	65.82 ± 2.44 ^k
	<i>W_L</i>	1.68 ± 0.02 ^g	0.79 ± 0.02 ^l	47.76 ± 0.83 ^h	14.27 ± 2.38 ^f	39.39 ± 1.15 ^l
<i>N_Z</i>	<i>W_S</i>	1.76 ± 0.12 ^h	0.65 ± 0.05 ^m	98.06 ± 0.88 ^a		
	<i>W_H</i>	1.76 ± 0.08 ^{hi}	0.67 ± 0.03 ⁿ	87.99 ± 0.40 ^b		
	<i>W_M</i>	1.65 ± 0.14 ⁱ	0.52 ± 0.05 ^o	90.20 ± 0.84 ^c		
	<i>W_L</i>	1.69 ± 0.16 ^j	0.50 ± 0.03 ^p	81.84 ± 0.55 ^d		

表 3 水氮耦合对小粒咖啡幼树水氮利用关系的影响

Tab.3 Water-nitrogen coupling effect on relationship of water and nitrogen use of young arabica coffee tree				
<i>X</i>	<i>Y</i>	回归模型	决定系数 <i>R</i> ²	<i>P</i> 值
灌水量/(L·株 ⁻¹)	水分利用效率/(kg·m ⁻³)	$Y = -0.003\ 5X^2 + 0.237\ 2X - 1.188\ 4\ (N_H)$	0.593	0.017 3
		$Y = -0.006\ 1X^2 + 0.347\ 4X - 2.018\ 6\ (N_M)$	0.753	0.001 8
		$Y = 0.043\ 8X + 0.714\ 1\ (N_L)$	0.863 1	<0.001
	氮素吸收总量/(g·株 ⁻¹)	$Y = 0.006\ 2X + 1.525\ 3\ (N_Z)$	0.023	0.630 0
		$Y = -0.002\ 6X^2 + 0.204\ 6X - 1.786\ 3\ (N_H)$	0.779 6	0.001 1
		$Y = -0.005X^2 + 0.308\ 8X - 2.947\ 7\ (N_M)$	0.918 5	<0.001
		$Y = 0.055\ 9X - 0.426\ 5\ (N_L)$	0.916 7	<0.001
	氮素表观利用效率/%	$Y = 0.014\ 9X + 0.129\ 6\ (N_Z)$	0.490 4	0.012 4
		$Y = 1.651\ 1X - 19.758$	0.672 8	0.001 0
施氮量/(kg·kg ⁻¹)	水分利用效率/(kg·m ⁻³)	$Y = -0.031\ 2X^2 + 0.334\ 2X + 1.672\ 1$	0.537 3	<0.001
	氮素吸收总量/(g·株 ⁻¹)	$Y = -0.033\ 1X^2 + 0.375\ 2X + 0.614\ 9$	0.588 0	<0.001
	氮素表观利用效率/%	$Y = -4.568\ 8X + 44.41$	0.322 3	<0.001

标的变化作出适应性反应^[19]。干旱胁迫抑制叶绿素的生物合成,提高叶绿素酶活性并加速叶绿素分解,导致叶绿素含量显著下降^[20]。而本试验发现,增加灌水不同程度地降低了叶绿素和类胡萝卜素,这可能与水分亏缺程度及灌水降低根区土壤矿物氮浓度有关。土壤水分亏缺时,为保证组织水势下降时细胞膨压得以尽量维持和生理代谢活动的正常进行,植株积累大量的渗透调节物质,防止细胞和组织脱水并提高水分利用率^[21]。本研究也表明,增加灌水能不同程度地降低丙二醛、脯氨酸和可溶性糖含量,同时能促进根系的新陈代谢和吸收补偿功能。干旱条件下,施氮可以增加植物体内可溶性有机物质和无机离子的积累,提高植株的渗透调节能力,改善植株水分状况^[22]。本研究中,适量施氮明显促进

了小粒咖啡叶片脯氨酸和可溶性糖的积累,增强渗透调节能力,而过量施氮抑制了可溶性糖和根系活力的提高。这可能是由于适宜的施氮促进了氮代谢,同时也提高了植株碳同化效率,而参与渗透调节的许多物质为碳氮代谢的产物^[23],施氮过量后,植株吸氮量增加,氮素同化需要更多的碳骨架和能量,进而会影响其他代谢过程,可溶性糖含量下降可能与叶端糖输出增加有关,也可能与光合能力不足有关。本研究发现,叶片丙二醛含量随施氮量的增加而逐渐降低,说明适当提高施氮水平可以缓解膜脂过氧化作用,增强抗逆性。另外发现,灌水对小粒咖啡叶片生理指标的影响与施氮水平密切相关。*N_Z*时增加灌水抑制了叶绿素和脯氨酸累积,施氮对叶绿素和脯氨酸的促进作用受灌水水平的影响不明

显。 N_z 时充分灌水限制了根系正常的生理代谢,降低了根系活力,可能的原因是 N_zW_s 处理的光合速率较低,光合同化物向根部的供应减少,进而影响根系活力^[24],表明单独通过增加灌水来促进植株根系活力的作用是有限的;施氮时根系活力随着灌水水平增加而增加。

土壤水分和硝态氮含量与作物对水分和氮素的吸收利用有关。 W_L 时的土壤硝态氮累积明显,主要由于 W_L 处理抑制了干物质生产,从而降低了氮素吸收利用。提高施氮量能促进植株氮素吸收总量,但抑制了氮素吸收效率^[25]。研究表明, N_z 时氮素吸收总量与灌水量显著正相关,这与增加灌水促进干物质累积有关。 N_L 时水分利用效率和氮素吸收总量均与灌水量显著正相关;当施氮水平较高时(N_M 和 N_H 处理),水分利用效率和氮素吸收总量均随灌水水平先增后减。结果说明,当施氮水平较低时,通过增加灌水量对提高氮素吸收总量是有效的,而当施氮水平较高时,灌水量低于阈值时水氮表现出明显的节水互补效应,灌水量高于阈值时水分利用效率呈下降趋势。氮素表观利用效率与灌水量显著正相关,主要由于水分亏缺加重时会抑制作物根系生长,降低根系吸收面积和吸收能力,使木质部液流粘滞性增大,降低作物对土壤养分的吸收和运输。同时,水分影响土壤养分的化学有效性与动力学有效性,严重水分亏缺时土壤的有效养分不能变为根际的实际有效养分。施氮量与水分利用效率、氮素吸收总量均呈显著二次曲线关系,这与对甜瓜的研究结果相吻合^[26]。施氮量与氮素表观利用效率显著负相

关,这也与施氮水平较高时土壤硝态氮累积较多相统一。研究表明,表观氮素损失随施氮量的增加而增加,氮素表观损失量与供氮水平正相关;同时高施氮量适当下调,可减少氮素残留对环境的污染^[27-28]。本研究结果发现, N_L 处理虽然可以获得较高的氮素吸收效率和氮素表观利用效率,但其水分利用效率远低于 N_M 和 N_H 处理。 N_MW_H 组合的水分利用效率最大,同时能获得 N_M 和 N_H 处理下最大的氮素表观利用效率和氮素吸收效率。

4 结论

(1)与低水相比,增加灌水使小粒咖啡叶绿素、类胡萝卜素、丙二醛、脯氨酸和可溶性糖含量分别降低 5.8% ~ 15.5%、6.0% ~ 14.4%、14.2% ~ 30.3%、27.6% ~ 60.0% 和 22.6% ~ 57.5%,根系活力和水分利用效率分别提高 15.8% ~ 63.8% 和 21.6% ~ 29.6%。低水处理的土壤硝态氮明显累积,抑制了氮素吸收利用。

(2)与无氮相比,增加施氮使丙二醛含量降低 23.8% ~ 49.8%,叶绿素、类胡萝卜素、脯氨酸、可溶性糖、根系活力和水分利用效率分别提高 49.0% ~ 88.4%、21.9% ~ 60.9%、509% ~ 703%、20.7% ~ 52.3%、23.5% ~ 41.8% 和 21.6% ~ 53.9%。与低氮相比,中氮和高氮处理氮素吸收效率分别降低 43.5% 和 57.1%。

(3)中氮高水的水分利用效率最大,同时中氮和高氮下的氮素表观利用效率和氮素吸收效率也最大。因此,中氮高水为水氮高效利用组合。

参 考 文 献

- 1 Cai Chuantao, Cai Zhiquan, Yao Tianquan, et al. Vegetative growth and photosynthesis in coffee plants under different watering and fertilization managements in Yunnan, SW China[J]. *Photosynthetica*, 2007, 45(3): 455 - 461.
- 2 蔡涛涛, 蔡志全, 解继武, 等. 田间不同水肥管理下小粒咖啡的生长和光合特性[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1207 - 1212.
Cai Chuantao, Cai Zhiquan, Xie Jiwu, et al. Growth and photosynthetic characteristics of field-grown coffee arabica under different watering and fertilization managements[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1207 - 1212. (in Chinese)
- 3 马强, 宇万太, 沈善敏, 等. 旱地农田水肥效应研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 665 - 673.
Ma Qiang, Yu Wantai, Shen Shanmin, et al. Research advances in water-fertilizer effect on dry land farm land[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 665 - 673. (in Chinese)
- 4 Nesme T, Brisson N, Lescourret F, et al. Epistix: a dynamic model to generate nitrogen fertilization and irrigation schedules in apple orchards, with special attention to qualitative evaluation of the model[J]. *Agricultural Systems*, 2006, 90(1-3): 202 - 225.
- 5 朱德兰, 王文娥, 楚杰. 黄土高原丘陵区红富士苹果水肥耦合效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(1): 152 - 155.
Zhu Delan, Wang Wene, Chu Jie. Study on the coupling effect of water and fertilizer on apple in hilly area of Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(1): 152 - 155. (in Chinese)
- 6 华元刚, 陈秋波, 林钊沐, 等. 水肥耦合对橡胶树产胶量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1211 - 1216.
Hua Yuangang, Chen Qiubo, Lin Zhaomu, et al. Coupling effects of water and chemical fertilizers on *Hevea brasiliensis* latex yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1211 - 1216. (in Chinese)
- 7 王海艺, 韩烈保, 杨永利, 等. 水肥对洋白蜡生物量的耦合效应研究[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(增刊): 64 - 68.
Wang Haiyi, Han Liebao, Yang Yongli, et al. Coupling effects of water and fertilizer on the biomass of *Fraxinus pennsylvanica* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(Supp.): 64 - 68. (in Chinese)

- 8 董雯怡, 赵燕, 张志毅, 等. 水肥耦合效应对毛白杨苗木生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2194–2200.
Dong Wenyi, Zhao Yan, Zhang Zhiyi, et al. Coupling effects of water and fertilizer on the biomass of *Populus tomentosa* seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2194–2200. (in Chinese)
- 9 Nazareno R, Oliveira C, Sanzonowicz C, et al. Initial growth of Rubi coffee plant in response to nitrogen, phosphorus and potassium and water regimes[J]. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 2003, 38(8): 903–910.
- 10 Arantes K, Faria M, Rezende F. Recovery of coffee tree (*Coffea arabica* L.) after pruning under different irrigation depths[J]. Acta Scientiarum Agronomy, 2009, 31(2): 313–319.
- 11 商放泽, 杨培岭, 任树梅. 水氮量对层状包气带土壤氮素迁移累积的影响分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 112–121.
Shang Fangze, Yang Peiling, Ren Shumei. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrogen leaching and accumulation in deep soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 112–121. (in Chinese)
- 12 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 石羊河流域武威绿洲春玉米水氮耦合效应[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2222–2228.
Liu Xiaogang, Zhang Fucang, Yang Qiliang, et al. Coupling effect of water and nitrogen on spring maize in Wuwei Oasis of Shiyang River Basin, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2222–2228. (in Chinese)
- 13 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 14 孔艳菊, 孙明高, 苗海霞, 等. 干旱胁迫下元宝枫生长性状及生理特性研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 26–31.
Kong Yanju, Sun Minggao, Miao Haixia, et al. Growth properties and physiological characteristics of *Acer truncatum* under drought stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(5): 26–31. (in Chinese)
- 15 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 16 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 等. 施氮量对高产早稻氮素利用特征及产量形成的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1409–1416.
Zeng Yongjun, Shi Qinghua, Pan Xiaohua, et al. Effects of nitrogen application amount on characteristics of nitrogen utilization and yield formation in high yielding early hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(8): 1409–1416. (in Chinese)
- 17 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 等. 不同施肥对春玉米产量, 效益及氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 861–868.
Zhan Xiumei, Li Tingting, Han Xiaori, et al. Effects of nitrogen fertilization on yield, profit and nitrogen absorption and utilization of spring maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(4): 861–868. (in Chinese)
- 18 叶优良, 黄玉芳, 刘春生, 等. 氮素实时管理对夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(1): 152–157.
Ye Youliang, Huang Yufang, Liu Chunsheng, et al. Effect of in-season nitrogen management strategy on maize grain yield and nitrogen use efficiency[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(1): 152–157. (in Chinese)
- 19 曹红星, 孙程旭, 李和帅, 等. 水肥胁迫对槟榔幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2012, 37(6): 87–91.
Cao Hongxing, Sun Chengxu, Li Heshuai, et al. The effect of water and nutrient stress on the growth and physiological characters of *Areca catechu* L. Seedlings[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2012, 37(6): 87–91. (in Chinese)
- 20 刘小刚, 耿宏焯, 程金焕, 等. 保水剂和灌水对小粒咖啡苗木的节水调控效应[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 134–139.
Liu Xiaogang, Geng Hongzhuo, Cheng Jinhuan, et al. Effect of super absorbent polymer and irrigation on improving water use efficiency of arabica coffee seedling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 134–139. (in Chinese)
- 21 张永峰, 殷波. 混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(1): 46–50.
Zhang Yongfeng, Yin Bo. Influences of salt and alkali mixed stresses on antioxidative activity and MDA content of *Medicago sativa* at seedling stage [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(1): 46–50. (in Chinese)
- 22 尹丽, 刘永安, 谢财永, 等. 干旱胁迫与施氮对麻疯树幼苗渗透调节物质积累的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 632–638.
Yi Li, Liu Yongan, Xie Caiyong, et al. Effects of drought stress and nitrogen fertilization rate on the accumulation of osmolytes in *Jatropha curcas* seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 632–638. (in Chinese)
- 23 王贺正, 张均, 吴金芝, 等. 不同氮素水平对小麦旗叶生理特性和产量的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 69–75.
Wang Hezheng, Zhang Jun, Wu Jinzhi, et al. Effect of different levels of nitrogen on physiological characteristic of flag leaves and grain yield of wheat [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4): 69–75. (in Chinese)
- 24 张凤翔, 周明耀, 周春林, 等. 水肥耦合对水稻根系形态与活力的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 197–200.
Zhang Fengxiang, Zhou Mingyao, Zhou Chunlin, et al. Effects of water and fertilizer coupling on root morphological characteristics and activities of rice [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 197–200. (in Chinese)
- 25 郝树荣, 郑姬, 冯远周, 等. 水稻拔节期水氮互作的后效性影响研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 92–96.
Hao Shurong, Zheng Ji, Feng Yuanzhou, et al. After effects of water-nitrogen interaction on rice at jointing stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 92–96. (in Chinese)
- 26 王军, 黄冠华, 郑建华. 西北内陆旱区不同沟灌水肥对甜瓜水分利用效率和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2010,

43(15): 3168 – 3175.

Wang Jun, Huang Guanhua, Zheng Jianhua. Effect of water and fertilizer application on melon water use efficiency and quality with different furrow irrigation in the oasis arid region of Northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010,43(15):3168 – 3175. (in Chinese)

27 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3):264 – 270.

Ju Xiaotang, Pan Jiarong, Liu Xuejun, et al. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburban[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2003, 9(3):264 – 270. (in Chinese)

28 张学军, 赵营, 陈晓群, 等. 滴灌施肥中施氮量对两年蔬菜产量, 氮素平衡及土壤硝态氮累积的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11):2535 – 2545.

Zhang Xuejun, Zhao Ying, Chen Xiaoqun, et al. Effects of application of nitrogen on vegetable yield, nitrogen balance and soil nitrogen accumulation under two years' drip fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2535 – 2545. (in Chinese)

Biochemical Property and Water and Nitrogen Use Efficiency of Young Arabica Coffee Tree under Water and Nitrogen Coupling

Liu Xiaogang¹ Zhang Yan¹ Cheng Jinhuan² Zhong Yuan¹ Yang Qiliang¹

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650550, China
2. Tropical and Subtropical Economic Crops Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Baoshan 678025, China)

Abstract: The object was to explore precise management mode of water and nitrogen to tropical economic crop of young arabica coffee tree, using four levels of irrigation, W_s (75% ~ 85% field capacity), W_H (65% ~ 75% field capacity), W_M (55% ~ 65% field capacity) and W_L (45% ~ 55% field capacity), and four levels of nitrogen, N_H (0.60 g/kg), N_M (0.40 g/kg), N_L (0.20 g/kg) and N_z (0 g/kg). The effect of irrigation and nitrogen on biochemical index and water and nitrogen use of arabica coffee young tree was studied. The result showed that, compared with W_L , increasing irrigation amount reduced chlorophyll, carotenoid, malondialdehyde, proline and soluble sugar by 5.8% ~ 15.5%, 6.0% ~ 14.4%, 14.2% ~ 30.3%, 27.6% ~ 60.0% and 22.6% ~ 57.5% respectively, and increased root activity and water use efficiency by 15.8% ~ 63.8% and 21.6% ~ 29.6%, and reduced the average value of soil NO_3^- -N by 21.5% ~ 36.2%. Compared with N_z , increasing nitrogen rate reduced malondialdehyde by 23.8% ~ 49.8%, while increased chlorophyll, carotenoid, proline, soluble sugar, root activity and water use efficiency by 49.0% ~ 88.4%, 21.9% ~ 60.9%, 509% ~ 703%, 20.7% ~ 52.3%, 23.5% ~ 41.8% and 21.6% ~ 53.9% respectively, and increased the average value of soil NO_3^- -N by 2.73 ~ 14.44 times. Total N uptake was positively correlated with irrigation amount under N_z and N_L treatment, and water use efficiency and total N uptake increased at first and then decreased with irrigation amount under N_M and N_H treatment. Water use efficiency and total N uptake were quadratic curve relation with nitrogen rate under deferent irrigation treatment. Water use efficiency of N_M/W_H treatment was the largest, and N apparent recovery fraction and N uptake efficiency were the largest under N_M and N_H treatment. Thus combination of N_M/W_H was the efficient use of water and nitrogen of young arabica coffee tree.

Key words: Arabica coffee Water and nitrogen coupling Biochemical property Water and nitrogen use