doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.019

水氮耦合对干热区小粒咖啡产量和品质的影响

刘小刚　郝　琨　韩志慧　余　宁　杨启良　刘艳伟

（昆明理工大学现代农业工程学院，昆明 650500）

摘要：为探明干热区小粒咖啡优质高产的水肥管理模式，通过连续2 a大田试验研究旱季4个灌水水平（充分灌水W_1和亏缺灌水W_2、W_3、W_4，W_2、W_3和W_4灌水量分别为W_1的80%、60%和40%）和3个施氮水平（N_1:140 g/棵、N_2:100 g/棵和N_3:60 g/棵，纯氮量）对小粒咖啡产量、品质及水分利用效率的影响，并通过主成分分析对综合营养品质进行评价。结果表明，与W_4相比，提高灌水量可增加干豆产量42.8%～151.0%、生豆中绿原酸含量16.9%～31.5%，水分利用效率随灌水量的提高先增后减，W_2的水分利用效率最大。与N_3相比，提高施氮量增加干豆产量、水分利用效率、生豆中蛋白质和绿原酸含量分别为32.9%～42.6%、32.0%～45.8%、5.9%～9.7%和7.0%～12.6%，N_2的干豆产量和水分利用效率最大。与W_4N_3相比，提高水氮用量能同时增加干豆产量和水分利用效率，分别增加22.0%～307.5%和18.2%～205.3%。W_1N_2处理获得2 a的最大均产，为5 587.42 kg/hm^2。主成分分析结果表明，W_2N_2的综合营养品质最优，而水氮不协调会导致品质下降。与W_4N_3相比，W_2N_2显著提高干豆产量、水分利用效率和生豆中蛋白质和绿原酸含量，降低粗纤维含量。因此，从优质高产角度考虑，干热区小粒咖啡的水氮耦合模式为W_2N_2组合。

关键词：小粒咖啡；亏缺灌溉；氮肥；产量；品质；综合评价

中图分类号：S275.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2016)02-0143-08

Effect of Water and Nitrogen Coupling on Yield and Quality of Arabica Coffee in Dry-hot Area

Liu Xiaogang　Hao Kun　Han Zhihui　Yu Ning　Yang Qiliang　Liu Yanwei

(*Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: The yield and quality of arabica coffee cannot be guaranteed because of serious contradictory of water and heat, soil impoverishment and serious seasonal drought in Yunnan dry-hot valley. The objective of the research was to explore water and fertilizer management mode for good quality and proper yield of arabica coffee. Four levels of irrigation in dry season, i. e., sufficient irrigation level (W_1) and three deficit irrigation levels (W_2, W_3 and W_4), were designed with irrigation amounts for W_2, W_3 and W_4 as 80%, 60% and 40% of W_1, respectively, and three levels of nitrogen, i. e., N_1 (140 g/plant), N_2 (100 g/plant), N_3 (60 g/plant), were applied. The effect of drip irrigation and nitrogen levels on yield, quality and water use efficiency (WUE) of arabica coffee was studied by field experiments for two consecutive years, and the comprehensive nutritional quality was evaluated by principal component analysis. The results showed that compared with W_4 treatment, improving irrigation amount increased dry bean yield and chlorogenic acid of dry bean by 42.8% ~151.0% and 16.9% ~31.5%, respectively. WUE was firstly increased and then decreased with irrigation amount, WUE of W_2 treatment was the largest. Improving nitrogen application rate increased dry bean yield, WUE, protein and chlorogenic acid of dry bean by 32.9% ~42.6%, 32.0% ~45.8%, 5.9% ~9.7% and 7.0% ~12.6%, respectively,

收稿日期：2015-09-07　修回日期：2015-11-23

基金项目：国家自然科学基金项目(51109102、51469010、51379004)、云南省应用基础研究项目(2014FB130)和云南省教育厅重点项目(2011Z035)

作者简介：刘小刚(1977—)，男，副教授，博士，主要从事水资源高效利用研究，E-mail：liuxiaogangjy@126.com

and the yield of dry bean and WUE of N_2 were the largest compared with N_3 treatment. Compared with W_4N_3 treatment, improving irrigation amount and nitrogen application rate could increase dry bean yield and WUE by 22.0% ~ 307.5% and 18.2% ~ 205.3%, respectively. W_1N_2 treatment obtained the largest average dry bean yield of 5 587.42 kg/hm^2 in two years. Principal component analysis showed that the comprehensive nutritional quality of W_2N_2 treatment was the best, and in coordination between water and nitrogen resulted in decrease of yield and quality. Compared with W_4N_3, W_2N_2 treatment increased dry bean yield and WUE greatly, meanwhile it increased protein and chlorogenic acid but reduced fiber of dry bean significantly. On the basis of water-saving and high efficiency along with good quality and proper yield, the suitable mode of water and nitrogen management of arabica coffee was the combination of W_2 and N_2 treatments (W_2N_2) in arid-hot area.

Key words: arabica coffee; deficit irrigation; nitrogen fertilizer; yield; quality; comprehensive evaluation

引言

咖啡是世界上排名第 2 的原料型产品,其消费量为可可的 3 倍、茶叶的 4 倍[1]。2014 年云南小粒咖啡种植面积达 1.24×10^5 hm^2,产量达 1.18×10^8 kg,种植面积和产量均占我国咖啡种植面积和产量的 99% 以上。云南小粒咖啡(*Coffea arabica* L.)以“浓而不苦,香而不烈,略带果酸味”闻名于世[1]。干热区气候干旱炎热,降水量较少且分布不均,全年蒸发量为降水量的 6 倍左右,旱季持续时间长,土壤贫瘠。小粒咖啡生产受到土壤干旱和营养不足双重制约,产量和品质得不到保证[2]。因此,科学的水肥管理是当地小粒咖啡优质高产的关键。

充分灌溉能大幅提高咖啡产量,部分根区灌溉能改善咖啡豆品质,同时大幅提高水分利用效率[3]。咖啡的开花数和结果数随灌水量的增加而增加[4]。巴西 3 个生产区的咖啡豆化学组分受栽培环境(产地)影响较大,而受灌溉影响不明显[5]。施肥是作物获得高产的基本措施之一,氮肥的缺乏对 3 a 生小粒咖啡的产量影响最大,钾肥次之,磷肥最小。N、P_2O_5 和 K_2O 的适宜用量分别为 100、50、100 g/株[6]。施氮量对咖啡树的枝条腋芽数和新梢长度及氮素吸收利用影响显著[7-8]。分步施肥不能提高咖啡的产量,灌水量为 120% ET_0 时的产量最高[9]。低氮充分灌水可提高小粒咖啡苗木的形态指标,获得较高的干物质累积和水分利用效率[10]。刘小刚等研究了咖啡幼树水氮高效利用的水氮供给模式[11]。干热区小粒咖啡水肥管理粗放,有关产量和品质的水肥耦合效应研究还鲜见报道。

对于干热区这种特殊的季节性干旱地区,适量灌溉结合施氮是否能提高小粒咖啡产量和水分利用效率,同时改善品质,值得探讨。为此,本文研究 4 个灌水水平和 3 个施氮水平对小粒咖啡生长、产量及品质的影响,并用主成分分析法对生豆的营养品质进行综合评价,以期找到最佳的水氮耦合模式,为干热区小粒咖啡的水肥管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

大田试验于 2013—2015 年在云南省保山市潞江坝进行(21°59′N,98°53′E,海拔高度 750 m)。试验区年均降水量 755.40 mm,80% 集中在 6—10 月,年均蒸发量 2 101.90 mm,年均温 21.3℃,绝对最高气温 40.4℃,绝对最低气温 0.2℃,大于等于 10℃ 积温 7 694℃。年均日照时数 2 328 h,相对湿度 71%,属南亚热带半干旱季风气候,植被呈热带稀树灌草丛景观。供试土壤为老冲积层上发育而成的红褐色砂壤土,耕层土壤有机质质量比 10 ~ 15 g/kg,全氮 0.8 ~ 1.2 g/kg,全磷 0.8 ~ 1.5 g/kg,碱解氮 60 ~ 120 mg/kg,速效磷 5.0 ~ 20.0 mg/kg,速效钾 100 ~ 150 mg/kg。

供试作物为长势均匀的 4 a 生小粒咖啡(卡杜拉,Caturra),株行距为 1 m × 1.5 m(333 棵/hm^2)。灌溉方式采用地表滴灌,采用压力补偿式滴头,流量为 2.5 L/h,滴头设在距树基部两侧 0.4 m 处,间距与树距相同。

1.2 试验处理

试验设 4 个灌水水平和 3 个施氮水平,完全组合设计,共 12 个处理。每个处理重复 3 次,每个重复 10 棵咖啡树。根据该区咖啡逐月需水量资料[12],结合降水量确定旱季充分灌水定额,其值为咖啡耗水量减去有效降水量,灌水周期约为 7 d,遇到降雨顺延。4 个灌水水平包括充分灌水 W_1 和 3 个亏缺灌水(W_2、W_3 和 W_4),W_2、W_3 和 W_4 灌水量分别为 W_1 的 80%、60% 和 40%,2013 年 W_1、W_2、W_3 和 W_4 的灌水量分别为 472.00、377.60、283.20、188.80 mm,2014 年分别为 509.00、407.20、305.40、

203.60 mm。试验期间降水和 W_1 灌水过程见图 1。结合前人研究成果[6]和施肥习惯，设置 3 个施氮水平（纯氮量），即 N_1（140 g/棵）、N_2（100 g/棵）和 N_3（60 g/棵）。氮肥选用尿素，分别在 2 月和 8 月中旬等量施入。磷酸二氢钾为 150 g/棵，2 月与氮肥一同施入。施肥以咖啡树干为中心，离树干 40 cm 处开挖 20 cm 深的环形沟，沟内均匀撒施肥料后覆土。每月人工中耕除草 1 次，咖啡树没有整形修剪。

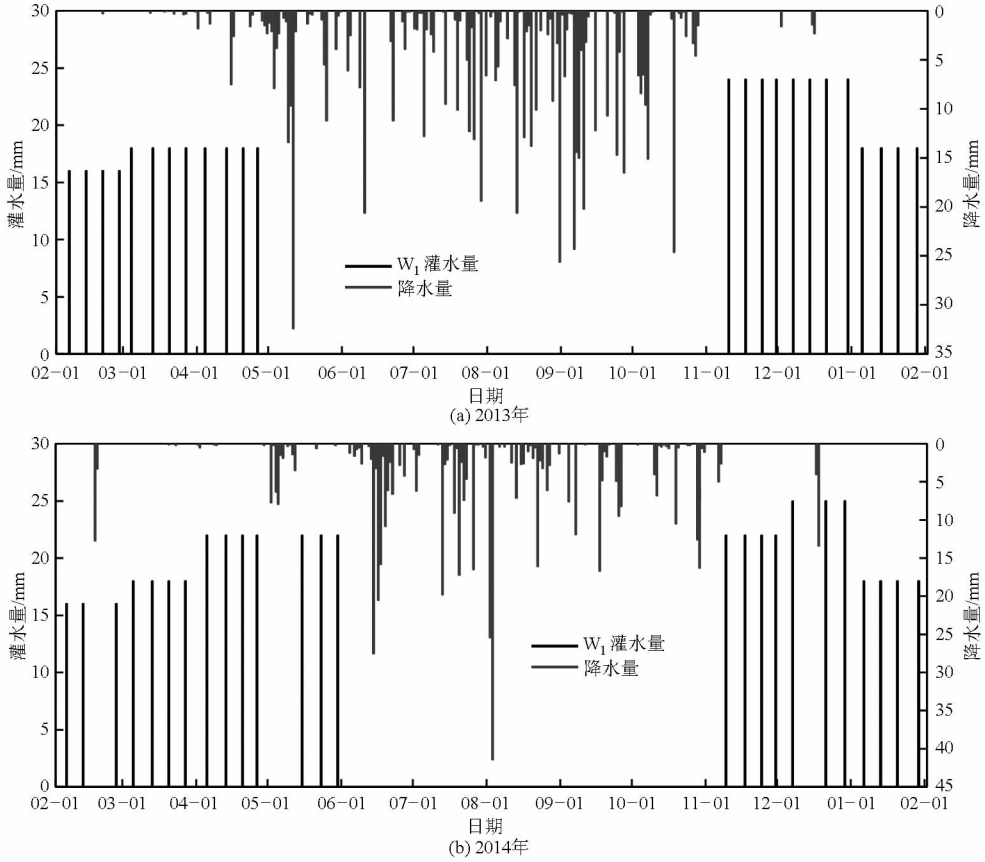

图 1　试验期间降水量和 W_1 处理灌水量

Fig. 1　Rainfall and irrigation amount of treatment W_1 in experiment periods

1.3　测定项目及方法

试验初期和鲜果采收结束时，测定咖啡树高、树径和枝条长度。每株树选取 10 个初始长度基本一致的枝条，编号后依次测定其长度。10 月至次年 1 月，分批测定鲜红或紫红色成熟鲜豆产量。鲜豆脱皮后加水淹没，静置发酵完成后清洗搓揉脱胶，日光自然干燥后测定干豆产量。

咖啡干豆脱壳、磨碎过筛后测定各品质指标。咖啡因、总糖、粗纤维、蛋白质、粗脂肪和绿原酸含量分别采用高效液相色谱法、蒽酮比色法、GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》、凯氏定氮法、索氏抽提法和高效液相色谱法测定[13]。

由于试验区地下水埋藏较深，地势平坦且降水量较少，而滴灌湿润深度较浅，故地下水补给、径流和深层渗漏均忽略不计，总耗水量计算公式为

$$ET = P_r + I - \Delta W \tag{1}$$

式中　P_r——生育期总有效降水量，mm

ΔW——试验初期和末期的土壤储水量变化量，mm

I——总灌水量，mm

有效降水量采用有效降雨系数法[14]计算。

土壤贮水量的计算公式为

$$W = 10\theta\rho H \tag{2}$$

式中　W——土壤贮水量，mm

θ——土壤体积含水率，%

ρ——土壤容重，g/cm^3

H——土层深度，cm

用土钻取土干燥法测得含水率，取土位置分别为距离滴灌带 0、20、40、60 cm，取土深度为 150 cm，每隔 10 cm 取 1 个样。

水分利用效率（kg/m^3）为咖啡干豆产量和总耗水量的比值。

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。营养品质的综合评价采用 SPSS 软件进行主成分分析（Principal component analysis，PCA），通过原变量转化为几个不相关的主成分，达到降维和删除

重复信息的目的。对产量和品质各指标进行标准化之前,先将咖啡因和粗纤维的测量值取倒数[15-16],使其与其他指标为同向指标,即数值越大,综合品质越好。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对小粒咖啡树生长的影响

由表 1 可知,灌水水平对 2 a 小粒咖啡树高、树径和枝条长度均值影响显著,与 W_4 相比,W_1、W_2 和 W_3 的树高分别增加 26.9%、19.7% 和 9.5%,枝条长度分别增加 19.8%、13.0% 和 5.0%,W_1 和 W_2 的树径分别增加 9.1% 和 6.1%,而 W_3 的树径增加不明显。施氮水平对树高和枝条长度影响显著,与 N_3 相比,N_1 和 N_2 的树高分别增加 5.1% 和 7.5%,枝条长度分别增加 9.8% 和 9.1%。2 因素的交互作用对树高影响显著,与 W_4N_3 相比,除 W_4N_1 的树高减小 6.9% 外,其余处理的树高增加 4.1% ~ 34.9%。2 因素及交互作用对各生长指标增量影响不显著。

表 1 水氮耦合对小粒咖啡 2 a 平均生长指标的影响

Tab. 1 Effect of water and nitrogen coupling on arabica coffee growth indexes in two years mm

灌水水平	施氮水平	树高		树径		枝条长度	
		均值	增量	均值	增量	均值	增量
W_1	N_1	1798 ± 25^{a}	438 ± 49^{a}	19.93 ± 0.26^{ab}	4.74 ± 0.53^{a}	196.25 ± 2.10^{a}	30.83 ± 3.01^{a}
	N_2	1737 ± 30^{ab}	352 ± 77^{a}	20.40 ± 0.42^{a}	5.03 ± 0.22^{a}	197.50 ± 1.85^{a}	40.00 ± 5.45^{a}
	N_3	1657 ± 38^{cd}	325 ± 88^{a}	19.94 ± 0.32^{ab}	4.55 ± 0.21^{a}	180.50 ± 2.09^{bcd}	25.67 ± 7.36^{a}
W_2	N_1	1681 ± 4^{bc}	446 ± 44^{a}	19.85 ± 0.14^{ab}	5.17 ± 0.25^{a}	186.36 ± 2.43^{ab}	36.72 ± 4.66^{a}
	N_2	1627 ± 16^{cde}	373 ± 33^{a}	19.60 ± 0.35^{abc}	4.96 ± 0.20^{a}	182.58 ± 6.50^{bc}	39.17 ± 4.70^{a}
	N_3	1591 ± 12^{def}	351 ± 14^{a}	19.18 ± 0.51^{bcd}	5.04 ± 0.37^{a}	172.72 ± 5.53^{cde}	21.78 ± 2.66^{a}
W_3	N_1	1557 ± 20^{ef}	433 ± 10^{a}	19.72 ± 0.06^{abc}	5.32 ± 0.13^{a}	177.58 ± 6.09^{bcd}	36.50 ± 8.39^{a}
	N_2	1535 ± 20^{f}	378 ± 18^{a}	19.07 ± 0.10^{bcd}	4.67 ± 0.41^{a}	167.84 ± 2.59^{def}	32.69 ± 9.55^{a}
	N_3	1388 ± 6^{g}	304 ± 45^{a}	18.41 ± 0.20^{de}	4.73 ± 0.27^{a}	157.78 ± 3.00^{fg}	27.22 ± 6.47^{a}
W_4	N_1	1241 ± 35^{h}	298 ± 17^{a}	18.08 ± 0.17^{e}	4.43 ± 0.07^{a}	162.56 ± 2.38^{ef}	35.44 ± 2.71^{a}
	N_2	1517 ± 48^{f}	326 ± 96^{a}	18.81 ± 0.20^{cde}	4.84 ± 0.19^{a}	169.69 ± 6.19^{cdef}	33.39 ± 9.22^{a}
	N_3	1333 ± 10^{g}	282 ± 7^{a}	18.37 ± 0.30^{de}	4.49 ± 0.50^{a}	147.06 ± 3.59^{g}	21.44 ± 2.07^{a}

注:数据为平均值 ± 标准差($n = 3$),同列数值后不同字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

2.2 水氮耦合对小粒咖啡产量的影响

2 因素及交互作用对 2 a 咖啡鲜豆产量的影响显著(除交互作用对 2013 年鲜豆产量影响不显著外)(图 2)。与 W_4 相比,2013 年 W_1、W_2 和 W_3 的鲜豆产量分别增加 149.3%、130.9% 和 32.0%,2014 年分别增加 155.1%、128.8% 和 48.6%,2 a 分别增加鲜豆产量均值为 152.4%、129.8% 和 40.8%。与 N_3 相比,2013 年 N_1 和 N_2 的鲜豆产量分别增加 34.8% 和 37.7%,2014 年分别增加 28.7% 和 46.3%,2 a 鲜豆产量均值分别增加 31.5% 和 42.3%。与 W_4N_3 相比,2013 年其余处理的鲜豆产量增加 73.3% ~ 371.2%,2014 年除 W_4N_1 的鲜豆产量减少 11.4% 外,其余处理的鲜豆产量增加 63.5% ~ 268.2%,2 a 其余处理的鲜豆产量均值增加 22.8% ~ 311.8%。

2 因素及交互作用对咖啡干豆产量的影响显著(图 3)。与 W_4 相比,2013 年 W_1、W_2 和 W_3 的干豆产量分别增加 146.1%、136.8% 和 34.6%,2014 年干豆产量分别增加 155.3%、133.1% 和 50.1%,2 a 干豆产量均值分别增加 151.0%、134.8% 和 42.8%。与 N_3 相比,2013 年 N_1 和 N_2 的干豆产量分别增加 36.9% 和 37.7%,2014 年分别增加 29.4% 和

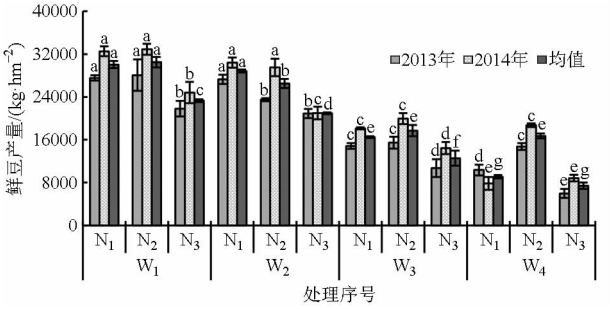

图 2 水氮耦合对小粒咖啡鲜豆产量的影响

Fig. 2 Effect of water and nitrogen coupling on fresh bean yield of arabica coffee

46.8%,2 a 干豆产量均值分别增加 32.9% 和 42.6%。与 W_4N_3 相比,2013 年其余处理的干豆产量增加 73.9% ~ 375.8%,2014 年除 W_4N_1 的干豆产量减少 13.0% 外,其余处理的干豆产量增加 62.2% ~ 270.4%,2 a 其余处理的干豆产量均值增加 22.0% ~ 307.5%。其中,W_1N_2 处理获得 2 a 的最大干豆均产 5 587.42 kg/hm^2,是 W_4N_3 的 4.07 倍。

2.3 水氮耦合对小粒咖啡品质的影响

灌水量除对咖啡生豆中总糖影响不显著外,对其余指标影响均显著,施氮水平对咖啡因、蛋白质、

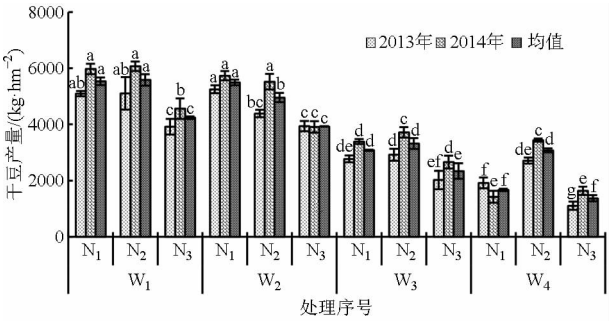

图 3　水氮耦合对小粒咖啡干豆产量的影响

Fig. 3　Effect of water and nitrogen coupling on dry bean yield of arabica coffee

粗脂肪和绿原酸影响显著，2 因素的交互作用对粗纤维、蛋白质和绿原酸影响显著（表 2）。与 W_4 相比，W_1 增加绿原酸含量 16.9%，增加蛋白质和降低粗脂肪含量不明显，而咖啡因和粗纤维含量分别降低 15.4% 和 10.3%。W_2 增加蛋白质、粗脂肪和绿原酸含量分别为 12.9%、20.8% 和 31.5%，而咖啡因和粗纤维含量分别降低 16.3% 和 8.0%。W_3 增加蛋白质、粗脂肪和绿原酸含量分别为 18.4%、9.4% 和 18.6%，而咖啡因和粗纤维含量降低不明显。与 N_3 相比，N_1 增加咖啡因、蛋白质和绿原酸含量分别为 9.8%、9.7% 和 7.0%。N_2 增加蛋白质和绿原酸含量分别为 5.9% 和 12.6%，而咖啡因含量增加不明显。与 N_3 相比，提高施氮量增加粗脂肪含量不明显。与 W_4N_3 相比，除 W_4N_2、W_4N_1 和 W_3N_3 降低粗纤维含量不明显外，其余处理粗纤维含量降低 5.5% ~11.3%。除 W_1N_2、W_1N_3、W_4N_1 和 W_4N_2 增加蛋白质含量不明显外，其余处理蛋白质含量增加 7.4% ~26.6%，其中 W_3N_1 蛋白质含量最大，为 W_4N_3 的 1.27 倍。除 W_4N_1 增加绿原酸含量不明显外，其余处理绿原酸含量提高 5.8% ~49.1%。

表 2　水氮耦合对 2 a 小粒咖啡生豆营养品质均值的影响

Tab. 2　Effect of water and nitrogen coupling on average nutritional qualities of arabica coffee dry bean in two years

灌水水平	施氮水平	咖啡因质量比/(mg·g⁻¹)	总糖质量分数/%	粗纤维质量分数/%	蛋白质质量比/(g·(100 g)⁻¹)	粗脂肪质量分数/%	绿原酸质量分数/%
W_1	N_1	9.13 ± 0.11^{efg}	10.76 ± 0.13^{c}	17.08 ± 0.23^{d}	18.70 ± 0.20^{cd}	14.86 ± 0.25^{de}	12.02 ± 0.16^{b}
	N_2	9.04 ± 0.14^{fg}	10.69 ± 0.06^{c}	17.18 ± 0.19^{d}	17.39 ± 0.15^{ef}	14.64 ± 0.24^{de}	11.96 ± 0.47^{b}
	N_3	9.16 ± 0.07^{efg}	10.52 ± 0.26^{c}	17.12 ± 0.39^{d}	16.87 ± 0.01^{f}	13.88 ± 0.13^{e}	10.44 ± 0.79^{de}
W_2	N_1	9.59 ± 0.24^{def}	11.02 ± 0.09^{abc}	18.17 ± 0.06^{bc}	20.13 ± 0.15^{b}	18.93 ± 0.15^{a}	12.53 ± 0.83^{b}
	N_2	8.95 ± 0.27^{fg}	11.54 ± 0.38^{ab}	17.45 ± 0.32^{cd}	19.76 ± 0.31^{b}	18.49 ± 0.28^{a}	14.31 ± 0.58^{a}
	N_3	8.53 ± 0.15^{g}	10.73 ± 0.22^{c}	17.05 ± 0.23^{d}	18.06 ± 0.16^{de}	17.24 ± 0.10^{b}	11.88 ± 0.45^{bc}
W_3	N_1	11.19 ± 0.09^{ab}	11.66 ± 0.08^{a}	17.96 ± 0.17^{bc}	21.29 ± 0.16^{a}	16.61 ± 0.12^{b}	11.78 ± 0.05^{bc}
	N_2	10.52 ± 0.35^{bc}	10.80 ± 0.32^{c}	17.99 ± 0.05^{bc}	20.54 ± 0.15^{ab}	16.37 ± 0.25^{bc}	12.03 ± 0.27^{b}
	N_3	9.85 ± 0.04^{cde}	10.68 ± 0.16^{c}	18.65 ± 0.27^{ab}	18.92 ± 0.55^{c}	16.53 ± 0.33^{b}	11.11 ± 0.66^{cd}
W_4	N_1	11.36 ± 0.16^{a}	10.48 ± 0.36^{c}	19.00 ± 0.32^{a}	17.38 ± 0.12^{ef}	14.95 ± 0.53^{d}	9.69 ± 0.17^{ef}
	N_2	10.92 ± 0.35^{ab}	10.92 ± 0.06^{bc}	19.04 ± 0.09^{a}	17.12 ± 0.26^{f}	15.51 ± 0.38^{cd}	10.15 ± 0.07^{ef}
	N_3	10.05 ± 0.46^{cd}	10.75 ± 0.23^{c}	19.23 ± 0.31^{a}	16.81 ± 0.41^{f}	14.78 ± 0.56^{de}	9.60 ± 0.37^{f}

2.4　水氮耦合对小粒咖啡水分利用效率的影响

2 因素及其交互作用对小粒咖啡的水分利用效率影响显著（图 4）。与 W_4 相比，2013 年 W_1、W_2 和 W_3 的水分利用效率分别增加 86.3%、95.2% 和 21.0%，2014 年水分利用效率分别增加 64.4%、71.1% 和 28.5%，2 a 水分利用效率均值分别增加 73.7%、81.3% 和 25.3%。与 N_3 相比，2013 年 N_1 和 N_2 的水分利用效率分别增加 37.9% 和 40.3%，2014 年分别增加 27.3% 和 50.0%，2 a 水分利用效率均值分别增加 32.0% 和 45.8%。与 W_4N_3 相比，2013 年其余处理的水分利用效率增加 73.9% ~292.2%，2014 年除 W_4N_1 的水分利用效率降低 13.0% 外，其余处理增加 38.9% ~156.8%，2 a 其余处理的水分利用效率均值增加 18.2% ~205.3%。其中，W_2N_1 处理获得 2 a 最大水分利用效率，为 0.65 kg/m³，是 W_4N_3 的 3.1 倍。W_2N_2、W_1N_2 和 W_1N_1 的水分利用效率仅次于 W_2N_1，分别比 W_4N_3 增加 176.2%、178.6% 和 176.0%。

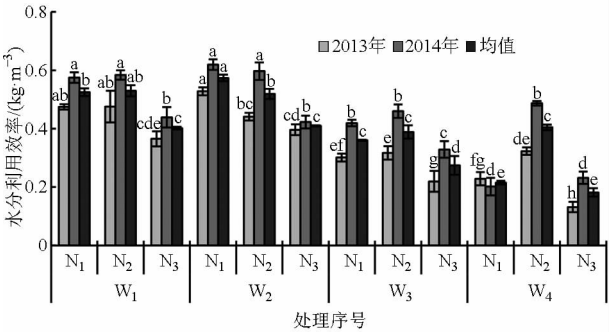

图 4　水氮耦合对小粒咖啡水分利用效率的影响

Fig. 4　Effect of water and nitrogen coupling on water use efficiency (WUE) of arabica coffee

2.5　小粒咖啡生豆营养品质主成分分析

2.5.1　营养品质指标相关性分析

表 3 表明咖啡因与粗纤维和绿原酸含量显著正

相关,总糖与蛋白质和绿原酸含量显著正相关,粗纤维与绿原酸含量显著正相关,蛋白质与粗纤维和绿原酸含量显著正相关,粗脂肪与绿原酸显著正相关。咖啡因与总糖和蛋白质含量存在不显著的负相关关系。因此,仅凭指标相关性分析不能对咖啡生豆品质做出全面科学评价,通过主成分分析法评价小粒咖啡生豆综合营养品质,可为小粒咖啡水氮优化管理提供实践参考。

表 3 营养品质指标相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient matrix of nutritional quality indexes

品质指标	咖啡因	总糖	粗纤维	蛋白质	粗脂肪	绿原酸
咖啡因	1					
总糖	-0.110	1				
粗纤维	0.770**	0.070	1			
蛋白质	-0.158	0.708**	0.137	1		
粗脂肪	0.157	0.614*	0.032	0.691**	1	
绿原酸	0.509*	0.616*	0.594*	0.665**	0.708**	1

注:**、* 分别表示 $P<0.01$、$P<0.05$ 水平显著相关。

2.5.2 主成分分析

KMO 统计量用于检验样本是否适合作主成分分析,一般要求 KMO 统计量大于 0.5。Bartlett 的球形度检验属于近似卡方检验,当 $P<0.05$ 时,表明适合作主成分分析。本研究中 KMO 统计量为 0.548,Bartlett 的球形度检验 $P<0.05$,适合作主成分分析。

(1) 特征根与方差贡献率

第 1 和第 2 主成分的特征根分别为 3.162 和 1.893,贡献率分别为 52.696% 和 31.547%,累积贡献率为 84.243%,表明前 2 个主成分基本可以反映各指标的全部信息,适于综合品质概括分析。

(2) 主成分表达式及综合得分

主成分函数表达式为

$$P_{C1}=0.199\,4C_{AF}+0.430\,3T_S+0.266\,9C_F+0.454\,6P_{RO}+0.460\,8C_{RF}+0.533\,6C_A \quad (2)$$

$$P_{C2}=0.643\,1C_{AF}-0.308\,8T_S+0.577\,8C_F-0.308\,5P_{RO}-0.196\,7C_{RF}+0.152\,4C_A \quad (3)$$

$$Z_F=0.625\,52P_{C1}+0.374\,48P_{C2} \quad (4)$$

式中 P_{C1}——第 1 主成分得分

P_{C2}——第 2 主成分得分

Z_F——综合得分

C_{AF}——咖啡因含量

T_S——总糖含量

C_F——粗纤维含量

P_{RO}——蛋白质含量

C_{RF}——粗脂肪含量

C_A——绿原酸含量

由主成分的表达式可知,第 1 主成分中总糖、蛋白质、粗脂肪和绿原酸含量具有较大的荷载,因此第 1 主成分是有利品质的主成分。第 2 主成分中咖啡因和粗纤维含量具有较大的载荷,因此第 2 主成分是不利品质的主成分。

由图 5 可知,W_1 和 W_4 的第 1 主成分评价得分为负,表明 W_2 和 W_3 能获得较优的营养品质;W_3 和 W_4 的第 2 主成分评价得分为负,可能由于严重水分亏缺导致咖啡豆品质降低所致。营养品质评价得分由大到小依次为:W_2N_2、W_2N_3、W_2N_1、W_1N_1、W_1N_2、W_3N_1、W_3N_2、W_1N_3、W_3N_3、W_4N_2、W_4N_3 和 W_4N_1。W_2N_2、W_2N_3、W_2N_1、W_1N_1、W_1N_2、W_3N_1 和 W_3N_2 得分为正,其中 W_2N_2 综合营养品质最优。而 W_1N_3、W_3N_3、W_4N_2、W_4N_3 和 W_4N_1 得分为负,综合营养品质较差。

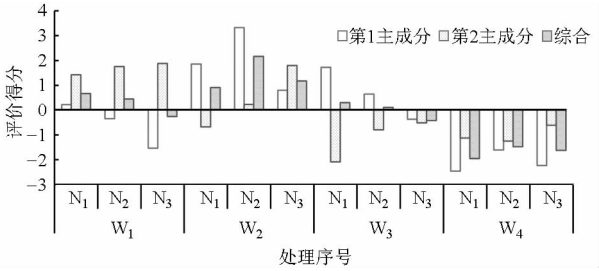

图 5 营养品质的主成分分析综合评价

Fig. 5 Comprehensive evaluation of principal component analysis of nutritional quality indexes

3 讨论

干热区光热充足,霜期短或基本无霜,暖冬气候特征明显,90% 的降水集中在雨季,旱季大气蒸发量达 1 300 mm 以上,土壤干旱胁迫严重[17]。因此,旱季灌溉对干热区小粒咖啡优质高产具有重要意义。研究表明,低氮充分灌水能提高小粒咖啡幼树的形态指标,并获得较高的干物质累积和水分利用效率[10]。本试验发现提高灌水量和施氮量能增加小粒咖啡的树高和枝条长度,且水氮交互作用对树高的影响显著。主要由于增加水肥用量缓解了土壤干旱和养分不足,为咖啡生长提供了比较适宜的水肥环境。这与前人[2,18-20]的研究结果一致。Chemura 等[19]发现高灌水量配施无机肥能有效促进咖啡生长。

水、肥是咖啡产量的两大限制因子。与 W_4 相比,提高灌水量能显著增加咖啡的干豆产量,但增幅随着灌水量的提高先增后减。与 N_3 相比,N_2 的增产幅度最大。水氮交互对产量影响显著,W_1N_2 获得 2 a 最大的干豆均产,可能是由于适量灌水能增强作

物根系吸收能力和吸收养分表面积[21]，适量施氮能促进作物对土壤水氮的利用，从而提高产量[22]。本研究还发现，氮肥的增产效应与灌水水平相关，灌水量较低时（W_4或 W_3），施氮越多越可能造成减产。而灌水量适宜时（W_2），氮肥的增产效果明显，当灌水量较高时，氮肥的增产效果不明显。这主要由于土壤水分严重亏缺抑制作物根系生长，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，同时抑制土壤养分的化学与动力学有效性[23]。本研究发现，水分利用效率随着灌水量和施氮量的提高先增后减，水氮供给较高反而降低水分利用效率。适量施氮提高水分利用效率可能是由于：施肥能促进根系发育和吸水功能，改善叶片的光合能力，并增加同化物的含量；同时，施肥能降低叶片水势，提高植株的提水能力，增加土壤水分的有效性[24-25]。W_2N_1处理的水分利用效率最大，这与适度亏缺灌溉下增施氮肥促进咖啡生殖生长和提高产量有关。

水肥适量组合能实现产量和品质的同步提高[26-28]。本研究发现，灌水对咖啡生豆大多化学营养品质影响显著，这与灌水影响叶片光合特性、光合产物累积以及植株体内无机物和有机物吸收、运输和转化有关[29]，从而改变了咖啡生豆的营养组分含量。随着灌水量的提高，咖啡生豆中绿原酸含量先增后降，可能的原因是：在土壤水分严重亏缺下，植株的初级生产力受到较大抑制，合成次级产物的原料减少，导致绿原酸含量减小[30]；而灌水较多时对绿原酸累积产生了“稀释效应”[31]。施氮水平对咖啡因、蛋白质、粗脂肪和绿原酸含量影响显著，施氮能显著提高蛋白质和绿原酸含量，这主要是由于氮素是咖啡生豆中含氮化合物的主要组分，这与相关研究结论一致[32]。咖啡的主要营养指标为咖啡因等，按照 ISO 10095 的检测方法，要求咖啡生豆中咖啡因质量比不大于 10 mg/g[33]。本试验中，W_3N_1、W_3N_2、W_4N_1、W_4N_2和 W_4N_3的咖啡因含量均超过了此标准，为不利水氮组合。而各处理的小粒咖啡生豆中总糖、粗纤维、蛋白质和粗脂肪含量均符合规定的范围。

水肥调控的主要目标是提质增产，涉及的评价指标较多且彼此关联[34]。主成分分析法研究发现，W_2N_2综合营养品质最优，该处理在获得较高产量的同时，也改善了生豆的营养品质，使生豆中蛋白质和绿原酸含量显著提高，表明在适宜的施氮条件下，适度亏缺灌水能实现小粒咖啡适产和综合品质较优，研究成果可为干热区小粒咖啡的水肥综合管理提供依据和参考，有一定的应用前景。

4　结论

（1）小粒咖啡干豆产量随灌水量的提高而增加，而随施氮量的提高先增后减。与 W_4N_3相比，W_4N_1有降低产量的风险。提高水氮用量的 2 a 干豆产量均值增加 22.0% ~307.5%，W_1N_2处理的产量最大。

（2）小粒咖啡水分利用效率随着灌水量或施氮量先增后减。与 W_4N_3相比，提高水氮用量的水分利用效率增加 18.2% ~205.3%。W_2N_1处理的水分利用效率最大，W_2N_2、W_1N_2和 W_1N_1也有较高的水分利用效率。

（3）在适宜的施氮条件下，适度亏缺灌水能保证咖啡不减产的同时改善咖啡生豆的营养品质。水氮过多、过少、不协调均会造成产量或品质降低。考虑到节水高效和优质适产，建议干热区小粒咖啡的水氮耦合模式为 W_2N_2组合。

参　考　文　献

1　黄家雄，李贵平. 中国咖啡遗传育种研究进展[J]. 西南农业学报，2008，21(4)：1178－1181.
Huang Jiaxiong, Li Guiping. Research progress of coffee breeding in China[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(4):1178－1181. (in Chinese)

2　Cai C, Cai Z, Yao T, 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.

3　Tesfaye S G, Ismail M R, Kausar H, et al. Plant water relations, crop yield and quality in coffee (*Coffea arabica* L.) as influenced by partial root zone drying and deficit irrigation [J]. Australian Journal of Crop Science, 2013, 7(9): 1361－1368.

4　Vaast P, Kanten R, Siles P, et al. Shade: a key factor for coffee sustainability and quality[C]//20th International Conference on Coffee Science, 2004: 11－15.

5　Franck N, Vaast P. Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels [J]. Trees, 2009, 23(4): 761－769.

6　董云萍，黎秀元，闫林，等. 不同种植模式咖啡生长特性与经济效益比较[J]. 热带农业科学，2011，31(12)：12－16.
Dong Yunping, Li Xiuyuan, Yan Lin, et al. Comparison on growth characteristics and economic benefits of coffee under diferent planting types [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2011, 31(12):12－16. (in Chinese)

7　Tatiele A B, Klaus R, Osny O S, et al. The ^{15}N isotope to evaluate fertilizer nitrogen absorption efficiency by the coffee plant [J]. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 2007, 79(4):767－776.

8 Nazareno R B, Oliveira C A S, 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.

9 Arantes K R, Faria M A, Rezende F C. Recovery of coffee tree (*Coffea arabica* L.) after pruning under different irrigation depths [J]. Acta Scientiarum Agronomy, 2009, 31(2): 313 – 319.

10 钟原, 刘小刚, 耿宏焯, 等. 亏缺灌溉与氮营养对小粒咖啡苗木生长及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 89 – 93.
Zhong Yuan, Liu Xiaogang, Geng Hongzhuo, et al. Effect of deficit irrigation and nitrogen fertilizer on growth and water consumption of coffee arabica seedling [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 89 – 93. (in Chinese)

11 刘小刚, 张岩, 程金焕, 等. 水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8):160 – 166.
Liu Xiaogang, Zhang Yan, Cheng Jinhuan, et al. Biochemical property and water and nitrogen use efficiency of young arabica coffee tree under water and nitrogen coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 160 – 166. (in Chinese)

12 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要农作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

13 张意静. 食品分析技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.

14 郭元裕. 农田水利学[M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.

15 李方方, 王瑗玲, 刘凤荣, 等. 基于主成分分析法和层次分析法的宁阳县农地效益评价及方法比较[J]. 山东农业大学学报:自然科学版, 2015,46(1):69 – 73.
Li Fangfang, Wang Ailing, Liu Fengrong, et al. Evaluation on the efficiency of rural land in Ningyang County with principal component analysis and analytic hierarchy process and the comparison between two methods[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2015, 46(1):69 – 73. (in Chinese)

16 黄家雄, 吕玉兰, 程金焕, 等. 不同海拔对小粒种咖啡品质影响的研究[J]. 热带农业科学, 2012, 32(8): 4 – 7.
Huang Jiaxiong, Lü Yulan, Cheng Jinhuan, et al. Preliminary study on the influence of different altitudes on the quality of coffee arabic[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2012, 32(8): 4 – 7. (in Chinese)

17 穆军, 李占斌, 李鹏, 等. 干热河谷干季土壤水分动态研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 22 – 25.
Mu Jun, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Study on soil moisture dynamic variation law in dry seasons in dry hot valley areas[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(12): 22 – 25. (in Chinese)

18 Sakai E, Barbosa E A A, de Carvalho Silveira J M, et al. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different population arrangements and with and without drip irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2015, 148: 16 – 23.

19 Chemura A. The growth response of coffee (*Coffea arabica* L.) plants to organic manure, inorganic fertilizers and integrated soil fertility management under different irrigation water supply levels [J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2014, 3(2): 1 – 9.

20 Perdoná M J, Soratto R P. Irrigation and intercropping with macadamia increase initial arabica coffee yield and profitability [J]. Agronomy Journal, 2015, 107(2): 615 – 626.

21 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水分胁迫和氮肥对花生根系形态发育及叶片生理活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2):450 – 456.
Ding Hong, Zhang Zhimeng, Dai Liangxiang, et al. Effects of water stress and nitrogen fertilization on peanut root morphological development and leaf physiological activities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2):450 – 456. (in Chinese)

22 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(1):197 – 204.
Wang Xi'na, Wang Chaohui, Li Shengxiu. The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water nitrogen dynamics[J]. Acta Ecologica Sinsca, 2007, 27(1):197 – 204. (in Chinese)

23 胡田田, 康绍忠, 张富仓. 局部灌水方式对玉米不同根区氮素吸收与利用的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(11): 2290 – 2295.
Hu Tiantian, Kang Shaozhong, Zhang Fucang. Effects of local irrigation on absorption and use of nitrogen from different root zones of maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(11): 2290 – 2295. (in Chinese)

24 伍维模, 董合林, 王萍, 等. 水分与氮素对南疆膜下滴灌棉花水分利用效率与蒸腾速率的影响[J]. 西北农业学报, 2006, 15(1): 11 – 15.
Wu Weimo, Dong Helin, Wang Ping, et al. The effects of water and nitrogen on water use efficiency and transpiration rate in mulched-cotton by drip irrigation in South-Xinjiang [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2006, 15(1): 11 – 15. (in Chinese)

25 张仁陟, 李小刚, 胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. 植物营养和肥料学报, 1999, 5(3): 221 – 226.
Zhang Renzhi, Li Xiaogang, Hu Hengjue. The mechanism of fertilization in increasing water use efficiency [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(3): 221 – 226. (in Chinese)

26 Massoudifar O, Darvish Kodjouri F, Noor Mohammadi G, et al. Effect of nitrogen fertilizer levels and irrigation on quality characteristics in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014, 60(7): 925 – 934.

(下转第 160 页)

41(3):489 – 491. (in Chinese)

28 Ghosh P K, Dayal D, Bandyopadhyay K K, et al. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut[J]. Field Crops Research, 2006, 99(2 – 3):76 – 86.

29 中华人民共和国水利部. 灌溉试验规范 SL13—2004[S]. 北京:中国水利水电出版社出版,2004.

30 黄洁,金莉莉,李振杰,等. 南疆沙漠腹地地温变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2013, 27(1):148 – 153.
Huang Jie, Jin Lili, Li Zhenjie, et al. Variation of soil temperature characteristics at Tazhong, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1):148 – 153. (in Chinese)

31 赵艳,王连芬,杨青松. 萌发温度及品种对青稞种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 种子,2013, 32(11):34 – 41.
Zhao Yan, Wang Lianfen, Yang Qingsong. Effects of temperature and variety on germination and seedling growth of naked barley [J]. Seed, 2013, 32(11):34 – 41. (in Chinese)

32 Lin Rinuan, Zhang Yong. Relationship between temperature and grain formation in later development period of winter wheat in Lhasa[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 10(3):321 – 326.

33 刘助. 近地面气温和土壤温度的观测[J]. 气象,1976(1):27 – 28.

34 李超,刘厚通,迟如利,等. 草地下垫面地表温度与近地面气温的对比研究[J]. 光学技术,2009, 35(4):635 – 639.
Li Chao, Liu Houtong, Chi Ruli, et al. Comparative study of grass land surface temperature and near-surface air temperature[J]. Optical Technique, 2009, 35(4):635 – 639. (in Chinese)

35 周斌,陈鹏狮,李晶,等. 辽宁省春季表层地温变化特征及其与气温的关系[J]. 中国农学通报,2014, 30(36):275 – 280.
Zhou Bin, Chen Pengshi, Li Jing, et al. Variation characteristics of surface ground temperature of Liaoning in spring[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(36):275 – 280. (in Chinese)

36 阿帕尔,叶尔克江,冯俊平. 昌吉市地温与气温关系初探[J]. 沙漠与绿洲气象,2007, 1(3):53 – 56.
Apar, Erkejan, Feng Junping. Analysis on the relation between soil temperature and air temperature of Changji City[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2007, 1(3):53 – 56. (in Chinese)

37 付强,马梓昇,李天霄,等. 北方高寒区不同覆盖条件下土壤温度差异性分析[J]. 农业机械学报,2014, 45(12): 152 – 159.
Fu Qing, Ma Ziao, Li Tianxiao, et al. Variability of soil temperature under different coverage conditions in alpine region of China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 152 – 159. (in Chinese)

(上接第 150 页)

27 Kuscu H, Turhan A, Ozmen N, et al. Optimizing levels of water and nitrogen applied through drip irrigation for yield, quality, and water productivity of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2014, 55(2): 103 – 114.

28 周罕觅, 张富仓, 李志军, 等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 171 – 180.
Zhou Hanmi, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Response of water demand signal, yield and fruit quality of peach tree to soil moisture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):171 – 180. (in Chinese)

29 许振柱, 于振文, 王东, 等. 灌溉量对小麦氮素吸收和运转的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 1002 – 1007.
Xu Zhenzhu, Yu Zhenwen, Wang Dong, et al. Effects of irrigation amount on absorbability and translocation of nitrogen in winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(10): 1002 – 1007. (in Chinese)

30 王建伟, 周凌云, 柯用春. 土壤水分对金银花中硝酸盐和绿原酸含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(4):721,731.
Wang Jianwei, Zhou Lingyun, Ke Yongchun. Effect of soil moisture on the content of nitrate and chlorogenic acid in honeysuckle [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(4):721,731. (in Chinese)

31 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量, 品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713 – 726.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Zhang Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 713 – 726. (in Chinese)

32 郝文雅, 刘德辉, 徐飞, 等. 施肥对栽培菊花土壤的有机无机复合性状和菊花产量与品质的影响[J]. 土壤, 2008, 40(4): 616 – 621.
Hao Wenya, Liu Dehui, Xu Fei, et al. Fertilization effects on organo-mineral complex status in soil and on yield and quality of *Chrysanthemum morifolium*[J]. Soils, 2008, 40(4): 616 – 621. (in Chinese)

33 李学俊. 小粒种咖啡栽培与初加工[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2014.

34 刘小刚,符娜,李闯,等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J]. 农业机械学报,2015,46(9):188 – 197.
Liu Xiaogang, Fu Na, Li Chuang, et al. Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(9):188 – 197. (in Chinese)