

有机肥施用对红地球葡萄产量、品质及土壤环境的影响

韩建¹, 尹兴², 郭景丽³, 吉艳芝¹, 张杰¹, 张丽娟^{1*}, 马文奇¹

(1 河北农业大学资源与环境学院/河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 071000;

2 河北经贸大学, 河北石家庄 050064; 3 河南心连心化学工业集团股份有限公司, 河南新乡 453731)

摘要:【目的】明确有机肥施用对河北葡萄主产区高产优质红地球葡萄产量、品质及土壤环境的影响, 为葡萄种植合理施用有机肥提供理论依据。【方法】以河北张家口市怀来县葡萄试验示范基地 13 年生红地球葡萄为试验材料, 进行为期 4 年的田间试验。设置 6 个处理, 分别为农民传统施肥 (CK)、单施化肥 (NPK)、单施有机肥 9 t/hm² (M)、有机肥 7.5 t/hm² + 化肥 (M1NPK)、有机肥 15 t/hm² + 化肥 (M2NPK)、有机肥 45 t/hm² + 化肥 (M3NPK), 采用常规方法测定葡萄产量、品质、重金属含量及果园土壤中硝态氮、微生物量碳和氮、重金属含量, 并对葡萄园土壤重金属累积达到限量所需年限进行推算。【结果】施用有机肥处理葡萄产量均显著高于单施化肥 (NPK), 其中以中量有机肥 + 化肥处理 (M2NPK) 的产量最高, 4 年 (2010—2013) 平均产量为 21503 kg/hm², 较农民传统施肥 (CK) 提高了 14%; 施用有机肥处理葡萄 Vc 含量比对照显著增加。各处理间葡萄百粒重、pH、可溶性固形物、可滴定酸和固酸比差异不显著。收获后 M2NPK 处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤硝态氮累积量下降, 土壤微生物生物量碳、氮含量显著高于 CK。连续 4 年施用有机肥后, 葡萄果实及果园土壤的重金属含量 (Cr、Cd、As、Pb、Hg、Cu、Zn) 均未超标, 但随着有机肥施用量的增加, 葡萄及土壤中的重金属分别呈现线性和二次函数累积趋势。M3NPK 处理土壤重金属含量较其他施用有机肥处理提前累积到限量水平。【结论】中量有机肥 + 化肥 (M2NPK) 处理葡萄的产量最高, 品质最佳, 而且降低了土壤硝态氮在各土层的累积, 增加了土壤微生物生物量碳、氮含量, 且葡萄果实和果园土壤重金属含量未超标。高量有机肥处理不会进一步提高红地球葡萄的产量和品质, 但快速增加果园土壤重金属累积。

关键词: 葡萄产量和品质; 鸡粪; 土壤硝态氮含量; 重金属累积

Effects of manure application on yield and quality of Red Globe grape and soil environment

HAN Jian¹, YIN Xing², GUO Jing-li³, JI Yan-zhi¹, ZHANG Jie¹, ZHANG Li-juan^{1*}, MA Wen-qi¹

(1 Resources and Environment College, Hebei Agricultural University/Hebei Province Farmland Ecological Environment Key Laboratory, Baoding, Hebei 071000, China; 2 Hebei University of Economics and Trade, Shijiazhuang 050064, China;

3 Henan Xinlianxin Chemical Industry Group Co., Ltd., Xinxiang, Henan 453731, China)

Abstract: 【Objectives】 This study was to quantify the effects of manure application on yield and quality of grape and on the soil environment, to provide theoretical basis for rational manuring in grape production.

【Methods】 A 4-years field experiment was conducted in Huailai National Grape Demonstration Base in Zhangjiakou, Hebei Province. The tested grape was the 13-year-old Red Globe, and six treatments were designed as: conventional fertilization (CK), chemical fertilizer (NPK), manure 9 t/hm² (M), chemical fertilizer + manure 7.5 t/hm² (M1NPK), chemical fertilizer + manure 15 t/hm² (M2NPK), and chemical fertilizer + manure 45 t/hm² (M3NPK). The yield, quality and heavy metal contents in grape fruit were measured. The nitrate nitrogen, microbial biomass carbon and nitrogen, and heavy metal contents in soil were determined. The years for reaching the heavy metal limits in vineyard soil were estimated. 【Results】 Compared with NPK treatment, M treatment

收稿日期: 2019-05-21 接受日期: 2019-08-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200106, 2018YFD0201307)。

联系方式: 韩建 E-mail: 942192325@qq.com; * 通信作者 张丽娟 Tel: 0312-7528210, E-mail: lj_zh2001@163.com

significantly increased the grape yield, and the highest average yield of the four years was obtained in M2NPK treatment, which was 21503 kg/hm^2 and 14% higher than that in the CK. The fruit Vc content in M2NPK treatment was also the highest, which was averaged 14.25 mg/100 g and significantly higher than that of the CK during 2010–2013 ($P < 0.001$). There were no significant differences in 100-fruit-weight, pH value, soluble solids and titrable acid contents and solid acid ratio among the treatments. In the M2NPK treatment after fruit harvest, the accumulation of nitrate in 0–20 cm and 20–40 cm soil layers were decreased in M2NPK treatment, while the soil microbial biomass carbon and nitrogen contents were significantly higher than those in CK. After 4-years continuous manure application, the contents of Cr, Cd, As, Pb, Hg, Cu and Zn in both grape fruits and soils were lower than the upper limits, however, they showed a linear and quadratic increasing trend with the increase of the organic manure application rate. Thereafter the M3NPK treatment would be the fastest one to accumulate soil heavy metal beyond the limits of pollution. 【Conclusions】 Application of 15 t/hm^2 of chicken manure combined with NPK fertilizers could produce high yield and good quality of grapes, low accumulation of nitrate nitrogen in surface and subsurface soil layers, and increase soil microbial carbon and nitrogen contents. The content of heavy metals in grape fruits and orchard soil is not beyond the limit in M2NPK treatment. Heavy application of manures will not produce further improvement in yield and quality of grapes, but lead to fast heavy metal accumulation in orchard soil under the tested experimental condition.

Key words: grape yield and quality; chicken manure; soil nitrate nitrogen content; heavy metal accumulation

葡萄是我国主产水果之一, 2016 年全国葡萄总产量达到 $1374.5 \times 10^4 \text{ t}$, 较 2000 年增加了 4.2 倍; 河北省是我国葡萄种植大省, 2016 年葡萄总产量达 $170.7 \times 10^4 \text{ t}$, 位居全国第二^[1]。但由于果农长期靠经验种植, 盲目施肥现象普遍存在, 对有机肥的施用无法正确把控, 导致葡萄的产量和品质与国外相比仍然存在较大的差距^[2-4]。尤其是过量施用有机肥不仅使葡萄品质下降, 而且还造成果园土壤重金属污染等一系列问题^[5-6]。王探魁等^[4]调查研究发现, 河北省葡萄园有机肥施用量之间存在较大差异, 怀来县 74% 的葡萄园有机肥施用量小于 15 t/hm^2 , 尚无法满足葡萄优质高产的需要; 涿鹿县 88% 的葡萄园有机肥施用量在 $60 \sim 75 \text{ t/hm}^2$ 之间, 远高于推荐的有机肥施用量。

有机肥合理施用有助于提高葡萄的产量和品质。王孝娣等^[7]试验发现, 施用有机肥后葡萄产量增加 30%~40%, 并且果实糖度提高而酸度降低。安胜等^[8]研究指出, 施用有机质含量大于 30% 的有机肥与对照组相比产量增加 20%, 含糖量提高 12%, 含酸量降低 26%。此外, 合理施用有机肥有利于优化土壤微生物群落结构与功能, 增加作物产量, 且与化肥配施能提高土壤微生物量氮来自土壤氮的百分比。

但是, 过量施用有机肥则会产生负效应, 欧美水果产业都有严格的有机肥资源管理政策^[9]。研究发现, 当有机肥施用量超过 12 t/hm^2 时, 对 3 年生酿酒葡萄

的生长、氮磷钾吸收和产量均产生明显的抑制作用^[8]。过量施用可能使土壤微生物的生存环境变劣^[10]。

叶荣生^[11]在柑橘的盆栽试验中也得出, 当有机肥施用量达到土壤总重的 16% 时, 柑橘幼苗的生长受到明显的抑制。同时, 有机肥过量施用还会引起环境污染。一方面可能导致深层土壤硝态氮累积量大幅增加, 淋失风险增大, 污染地下水和地表水, 造成水体富营养化^[12-13]; 另一方面有机肥也会给果园土壤带入重金属^[14-15], 果树体内重金属累积的风险增大, 致使果品变差。

鉴于目前河北省葡萄生产中有机肥施用上存在的问题, 加强对该地区有机肥施用的指导势在必行。虽然也有一些关于葡萄上有机肥施用的一些报道, 但关于河北葡萄主产区有机肥适宜施用量的研究还很少, 且缺乏对土壤环境影响的跟踪。因此, 本试验以张家口市怀来县葡萄试验示范基地 13 年生红地球葡萄为研究对象, 通过 4 年的田间试验, 明确河北省葡萄主产区有机肥合理施用量, 明确对红地球葡萄产量、品质以及土壤环境的影响, 以期有机肥的科学施用提供依据和指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

张家口市怀来县葡萄试验示范基地位于河北省葡萄主产区沙城产区, 县域内地形呈“V”型盆地,

内多丘陵山地, 盆地海拔为 450~850 m, 年降水量为 413 mm, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温在 3500 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 属温暖半干旱地区。试验始于 2010 年葡萄开花期前, 终于 2013 年收获后。供试果园土壤为褐土, 质地偏砂, 属中等肥力水平^[16], 土壤基本理化性质见表 1。供试鸡粪与葡萄园 0—20 cm 土壤各重金属元素含量见表 2。

1.2 试验方案

供试鲜食葡萄品种为红地球, 13 年生, 试验选取长势一致且无病虫害的植株, 每个处理小区 5 株, 且前后均设保护株。施肥方法为距中心干 30

cm 处的架前和架后分别开条形沟。供试肥料为鸡粪 (N-P₂O₅-K₂O 2.2-2.05-2.8)、复合肥 (N-P₂O₅-K₂O 12-21-21)、尿素 (N 46%)、磷酸二铵 (N-P₂O₅ 12-46)、碳铵 (N 17%) 和硫酸钾 (K₂O 48%), 共 6 个处理, 每个处理重复 3 次, 共 18 个小区。小区面积为 30 m² (6 m × 5 m), 随机排列。各处理施肥策略及养分投入量见表 3。田间管理与当地葡萄园管理一致。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 植株样品的采集与测定 葡萄收获期, 在每个小区的 5 株葡萄的前、中、后藤上, 随机剪取果粒 150 个, 用百分之一天平测定葡萄千粒重; 手持

表 1 葡萄园土壤理化性质
Table 1 The physical and chemical properties of vineyard soil

土层 Soil layer (cm)	有机质 OM (g/kg)	pH	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	容重 Bulk density (g/cm ³)	颗粒组成 (美国制) (%) Particle composition		
								砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
0—20	17.9	8.2	2.9	11.3	49.6	268	1.4	74.5	16.8	8.8
20—40	12.5	8.2	1.9	11.1	11.1	247	1.5	77.1	12.6	10.4
40—60	11.6	8.3	2.7	9.7	9.0	173	1.5	79.4	9.2	11.4
60—80	9.9	8.3	1.8	10.8	5.6	122	1.3	82.4	7.3	10.3
80—100	7.2	8.4	2.7	8.9	3.7	95	1.3	80.5	9.4	10.1

表 2 供试鸡粪及 0—20 cm 土层土壤重金属基础含量 (mg/kg)
Table 2 Heavy metal contents in tested chicken manure and 0—20 cm soil layer

项目 Item	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Cu	Zn
鸡粪 Chicken manure	0.17	8.23	5.60	1.44	0.33	31.00	120.00
土壤 Soil	0.13	21.70	48.40	6.94	—	28.83	70.13

表 3 葡萄 4 个生育期各处理肥料种类及养分投入量 (kg/hm²)
Table 3 Type and rate of fertilizers in four application periods in each treatment

处理 Treatment	采收后 After harvest	开花前 Before blooming	膨大期 Expand stage	着色期 Coloring stage	合计 Total		
					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK		AC750 + U750 + M22500	CF750 + DP750 + M33750	U750	2232	1659	1736
NPK	CF683	U360	CF450	CF300 + KS244.5	330	308	420
M	M9000		M6000		330	308	420
M1NPK	U33 + M7500	U285	CF150	CF150 + KS357	330	308	420
M2NPK	U33 + M15000	U285	CF150	CF150 + KS357	495	468	630
M3NPK	U33 + M45000	U285	CF150	CF150 + KS357	1155	1083	1470

注 (Note) : AC—碳铵 Ammonium bicarbonate; U—尿素 Urea; M—有机肥 Chicken manure; CF—复合肥 Compound fertilizer; DP—磷二铵 Diammonium phosphate; KS—硫酸钾 Potassium sulfate; 大写字母后数字为该肥料施用量 The numbers after the capital letters are the application rates of the fertilizers (kg/hm²).

糖酸仪测定可溶性固形物与可滴定酸；酸度计测定 pH 值；2,6-二氯酚靛酚滴定法测定果实中 Vc 含量。并在 2013 年 (试验第四年) 测定葡萄重金属 (Pb、Cd、Cr、Cu、Zn、As、Hg) 含量^[17]。

1.3.2 土壤样品的采集与测定 葡萄收获后, 每 20 cm 土层间隔采集土样, 采集深度为 0—100 cm。土壤硝态氮含量采用 TRACCS 2000 型连续流动分析仪测定; 2013 年采集 0—20 cm 土层土壤测定 Pb、Cd、Cr、Cu、Zn、As、Hg 含量, 采集 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤测定微生物量碳、氮含量^[17-18], 其中土壤微生物量碳、氮含量采用氯仿熏蒸—0.5 mol/L K₂SO₄ 直接浸提法测定。

依据《食用农产品产地环境质量评价标准 (HJ/T332-2006)》中 Cr、Cd、As、Pb、Zn、Hg 在果园土壤中的限量值, 按照以下公式推算葡萄园土壤重金属达到限量所需年限^[19]:

土壤中重金属年均增加值 = (土壤重金属累积值 - 土壤重金属初始值) / 有机肥施用年限 (1)

土壤重金属达到限量所需年限 = (土壤中的重金属元素限量值 - 土壤重金属初始值) / 土壤中重金属年均增加值 (2)

1.4 统计方法

采用 Excel、SAS 以及 SPSS 软件进行数据统计、方差分析与制图; 采用 LSD 法进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 有机肥施用量对葡萄产量的影响

施用有机肥可显著增加葡萄的产量, 尤其以有

机肥与化肥配施效果最好。施用有机肥的 CK、M、M1NPK、M2NPK 和 M3NPK 处理产量均显著高于 NPK, 且在养分投入量相同的情况下, NPK、M 和 M1NPK 三个处理的产量表现为 M1NPK > M > NPK; NPK 和 M 处理的葡萄产量连续四年偏低, 平均产量仅 14659 kg/hm² 和 16020 kg/hm², 较 CK 减产 22% 和 15%; 有机肥与化肥配施处理葡萄表现出高产, 以 M2NPK 处理的产量最佳, 连续四年的产量分别为 15435、23205、25845 和 21525 kg/hm², 显著高于 CK、NPK、M 和 M1NPK 处理, 与 CK 处理相比平均增产 14% (表 4)。

2.2 有机肥施用量对葡萄品质的影响

有机肥与化肥配施的葡萄品质优于化肥或有机肥单施的, 且随着有机肥施用年限的增加, 有机肥对葡萄品质有明显的提升趋势, 其百粒重和 Vc 含量表现出明显差异 (表 5)。有机肥与化肥配施的百粒重在试验第一年 (2010 年) 较低, 但自 2011 年开始表现出增加趋势, 其中 M2NPK 处理的百粒重在 2013 年达到 1.14 kg, 显著高于 CK; 有机肥增加了葡萄的 Vc 含量, 且自 2012 年开始处理间差异逐渐显著, 试验最后两年 (2012、2013 年) M、M1NPK、M2NPK 和 M3NPK 处理的 Vc 含量均显著高于 CK 和 NPK 处理; 各处理以 M2NPK 的 Vc 含量最高, 在 2010—2013 年分别为 17.42、12.72、15.95 和 10.90 mg/100g, 且在试验最后一年 (2013 年) 显著高于其他各处理。可溶性固形物含量在各处理间差异不显著, 但 M2NPK 处理在 4 年间含量较低, NPK 处理的含量表现出较高水平; pH、可滴定酸和固酸比在各处理间差异不显著, 但 CK 的 pH 和可滴

表 4 不同施肥处理葡萄产量及增产率

Table 4 Annual grape yield and yield increase of fertilization treatments

处理 Treatment	2010		2011		2012		2013		平均 Average	
	产量 Yield	增产率 Increase	产量 Yield	增产率 Increase	产量 Yield	增产率 Increase	产量 Yield	增产率 Increase	产量 Yield	增产率 Increase
	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)
CK	14880 ± 750 ab		20475 ± 1140 b		24120 ± 4620 ab		16095 ± 270 c		18893 ± 4233 b	
NPK	10080 ± 480 d	-32	16965 ± 975 d	-17	17115 ± 1440 d	-29	14475 ± 360 e	-10	14659 ± 3284 d	-22
M	11520 ± 720 c	-23	18885 ± 270 c	-8	18315 ± 1365 c	-24	15360 ± 720 d	-5	16020 ± 3374 c	-15
M1NPK	13275 ± 270 b	-11	20475 ± 735 b	0	22560 ± 1455 b	-6	18000 ± 720 b	12	18578 ± 3396 b	-2
M2NPK	15435 ± 900 a	4	23205 ± 495 a	13	25845 ± 2040 a	7	21525 ± 765 a	34	21503 ± 4419 a	14
M3NPK	15270 ± 840 a	3	21915 ± 495 a	7	24315 ± 1365 a	1	21360 ± 960 a	33	20715 ± 3950 a	10

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments at the 5% level.

表 5 2010—2013 年不同施肥处理葡萄品质

Table 5 Grape quality under different fertilization treatments from 2010 to 2013

处理 Treatment	百粒重 (kg) 100-berry weight	可溶性固形物 (%) Soluble solid	pH	Vc (mg/100g)	可滴定酸 (%) Titratable acid	固酸比 Solid acid ratio
2010						
CK	0.88 ± 0.04 bc	14.5 ± 0.5 a	3.49 ± 0.06 a	15.64 ± 0.12 b	0.43 ± 0.10 a	33.72 ± 3.65 a
NPK	0.92 ± 0.04 ab	14.8 ± 0.5 a	3.59 ± 0.13 a	15.81 ± 0.99 ab	0.52 ± 0.08 a	28.79 ± 5.48 a
M	0.97 ± 0.03 a	15.4 ± 0.5 a	3.58 ± 0.05 a	16.29 ± 0.87 a	0.55 ± 0.03 a	27.93 ± 0.54 a
M1NPK	0.89 ± 0.03 bc	15.1 ± 0.7 a	3.55 ± 0.13 a	16.67 ± 0.36 a	0.54 ± 0.07 a	28.4 ± 4.36 a
M2NPK	0.84 ± 0.02 c	14.9 ± 0.7 a	3.62 ± 0.06 a	17.42 ± 0.50 a	0.55 ± 0.10 a	27.6 ± 3.89 a
M3NPK	0.88 ± 0.01 bc	15.2 ± 0.3 a	3.69 ± 0.16 a	16.19 ± 0.76 ab	0.57 ± 0.08 a	27.05 ± 3.76 a
2011						
CK	1.07 ± 0.13 a	15.3 ± 0.6 a	3.47 ± 0.08 a	12.40 ± 0.10 ab	0.53 ± 0.01 a	28.87 ± 1.1 a
NPK	1.15 ± 0.01 a	15.7 ± 0.5 a	3.56 ± 0.18 a	12.18 ± 0.20 b	0.58 ± 0.06 a	27.47 ± 3.40 a
M	1.13 ± 0.03 a	16.0 ± 0.4 a	3.51 ± 0.09 a	12.40 ± 0.10 ab	0.61 ± 0.04 a	26.30 ± 2.21 a
M1NPK	1.08 ± 0.04 a	15.8 ± 0.0 a	3.67 ± 0.15 a	12.57 ± 0.06 a	0.56 ± 0.02 a	28.37 ± 1.06 a
M2NPK	1.17 ± 0.05 a	15.0 ± 0.3 a	3.64 ± 0.17 a	12.72 ± 0.14 a	0.58 ± 0.02 a	25.67 ± 1.00 a
M3NPK	1.12 ± 0.04 a	15.7 ± 0.2 a	3.69 ± 0.10 a	12.24 ± 0.14 bc	0.59 ± 0.05 a	26.50 ± 2.26 a
2012						
CK	1.03 ± 0.05 bc	15.8 ± 1.3 a	3.70 ± 0.07 a	14.36 ± 0.29 d	0.54 ± 0.01 b	29.28 ± 2.46 a
NPK	1.12 ± 0.02 ab	16.2 ± 0.2 a	3.79 ± 0.12 a	14.84 ± 0.80 c	0.58 ± 0.05 ab	28.03 ± 2.12 ab
M	1.08 ± 0.06 abc	15.8 ± 0.6 a	3.73 ± 0.12 a	15.43 ± 0.51 ab	0.61 ± 0.05 a	26.03 ± 2.79 b
M1NPK	1.14 ± 0.01 a	16.3 ± 0.1 a	3.81 ± 0.05 a	15.01 ± 0.84 b	0.58 ± 0.02 ab	28.05 ± 0.76 ab
M2NPK	1.08 ± 0.01 abc	15.6 ± 0.5 a	3.80 ± 0.04 a	15.95 ± 0.59 a	0.60 ± 0.04 a	25.94 ± 1.27 b
M3NPK	1.02 ± 0.09 c	15.7 ± 0.2 a	3.70 ± 0.10 a	14.97 ± 1.33 b	0.60 ± 0.02 a	25.98 ± 1.28 b
2013						
CK	1.10 ± 0.03 b	15.2 ± 0.8 a	3.25 ± 0.14 c	9.66 ± 0.13 d	0.51 ± 0.01 b	29.71 ± 1.60 a
NPK	1.13 ± 0.01 ab	15.2 ± 0.3 a	3.41 ± 0.10 abc	9.97 ± 0.18 c	0.56 ± 0.06 ab	27.27 ± 2.78 ab
M	1.12 ± 0.01 ab	14.5 ± 0.3 a	3.29 ± 0.09 bc	10.40 ± 0.12 b	0.60 ± 0.04 a	24.50 ± 2.39 b
M1NPK	1.11 ± 0.03 ab	14.1 ± 1.0 a	3.43 ± 0.15 ab	10.40 ± 0.31 b	0.54 ± 0.02 ab	26.06 ± 1.75 ab
M2NPK	1.14 ± 0.01 a	14.4 ± 1.0 a	3.50 ± 0.08 a	10.90 ± 0.07 a	0.59 ± 0.01 a	25.28 ± 2.25 ab
M3NPK	1.14 ± 0.01 ab	14.0 ± 0.8 a	3.54 ± 0.04 a	10.36 ± 0.24 b	0.58 ± 0.04 a	24.23 ± 3.03 b

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments at the 5% level.

定酸均最低。总体来看, M2NPK 处理的葡萄品质表现出较高水平。

2.3 有机肥施用量对果园土壤硝态氮分布的影响

各处理的土壤硝态氮含量在 0—100 cm 土层随着土层深度的增加而降低 (图 1)。在养分投入量相同的情况下, 施用有机肥可降低土壤硝态氮在 0—100 cm 土壤的累积, 但随着有机肥施用量的增加, 土壤

硝态氮含量有累积趋势。CK 和 M3NPK 的硝态氮累积量在各处理中较高, 两处理 2011—2013 年 0—20 cm 土层硝态氮累积量分别为 28.78、36.80、22.98 mg/kg 与 25.96、29.19、23.17 mg/kg, 20—40 cm 土层硝态氮累积量分别为 23.36、23.40、15.88 mg/kg 与 21.77、26.23、16.47 mg/kg, 均显著高于同期其他各处理。总体来看, M2NPK 处理的硝态氮含量在各

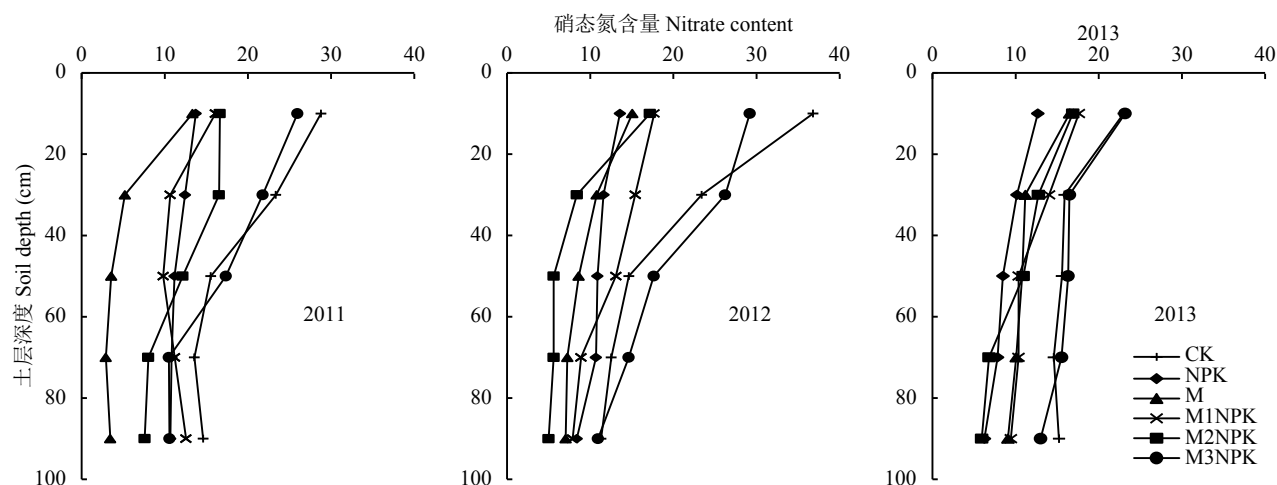


图 1 2011—2013 年 0—100 cm 土层土壤硝态氮含量

Fig. 1 Nitrate contents in 0–100 cm soil layer from 2011 to 2013

土层分布最适宜,不仅表层硝态氮在土壤中的累积量下降,且深层的土壤硝态氮含量减少。

2.4 有机肥施用量对果园土壤微生物量碳、氮的影响

施用有机肥显著增加了土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的微生物碳、氮含量,显著高于不施有机肥的 NPK 处理;在养分投入量相同的情况下,有机肥化肥配施处理 (M1NPK) 的微生物碳、氮含量显著高于 M 和 NPK 处理;M2NPK 和 M3NPK 处理的土壤微生物碳、氮含量在各土层均显著高于其它处理。总体上,各处理土壤微生物碳、氮含量在 0—20 与 20—40 cm 土层中的规律基本一致 (表 6)。

2.5 不同有机肥施用量对葡萄及果园土壤重金属累积的影响

2.5.1 不同有机肥施用量对葡萄重金属累积的影响

图 2 表明,施用有机肥增加了葡萄重金属的累积;且随着有机肥施用量的增加,葡萄重金属累积

量呈显著线性增加趋势,其 Cr、Cd、As、Pb、Hg、Cu 和 Zn 的线性相关系数分别达到 0.992、0.993、0.979、0.963、0.997、0.970、0.999。总体来看,目前葡萄重金属含量没有超过我国的国家标准 (GB 2762-2005、GB15199-94、GB 13106-91)。

2.5.2 不同有机肥施用量对土壤重金属累积的影响

由图 3 可知,施用有机肥明显增加了重金属在土壤中的累积,且随着有机肥施用量的增加,土壤重金属含量出现累积的趋势,与施肥量呈二次函数相关关系,其 Cr、Cd、As、Pb、Hg、Cu 和 Zn 的相关系数分别达到 0.997、0.985、0.999、0.940、0.971、0.982 和 0.989。依据中国土壤环境质量标准,目前供试果园土壤的重金属含量均未超过引起环境污染的上限。

土壤重金属含量会随有机肥的施入逐年累积,依据图 3 计算各重金属含量在三种有机肥施用模式下的 4 年平均增速,用公式 (1) 和公式 (2) 计算的结

表 6 不同施肥处理的土壤微生物碳、氮含量 (mg/kg)

Table 6 Soil microbial carbon and nitrogen contents under different fertilization treatments

处理 Treatment	微生物量碳 Microbial biomass C		微生物量氮 Microbial biomass N	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
CK	166.52 ± 14.55 bc	142.87 ± 11.91 b	46.61 ± 2.06 bc	42.85 ± 2.86 b
NPK	60.45 ± 6.17 d	39.00 ± 4.68 c	16.94 ± 2.75 d	13.66 ± 2.36 d
M	135.74 ± 11.69 c	141.12 ± 11.69 b	36.75 ± 3.80 c	31.24 ± 2.87 c
M1NPK	176.97 ± 13.74 b	162.05 ± 12.59 b	51.25 ± 5.28 b	44.24 ± 3.13 b
M2NPK	339.58 ± 20.09 a	320.45 ± 19.69 a	99.87 ± 5.70 a	98.90 ± 3.87 a
M3NPK	337.81 ± 20.61 a	348.97 ± 21.62 a	99.39 ± 4.31 a	94.00 ± 3.56 a

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column mean significance among treatments at 5% level.

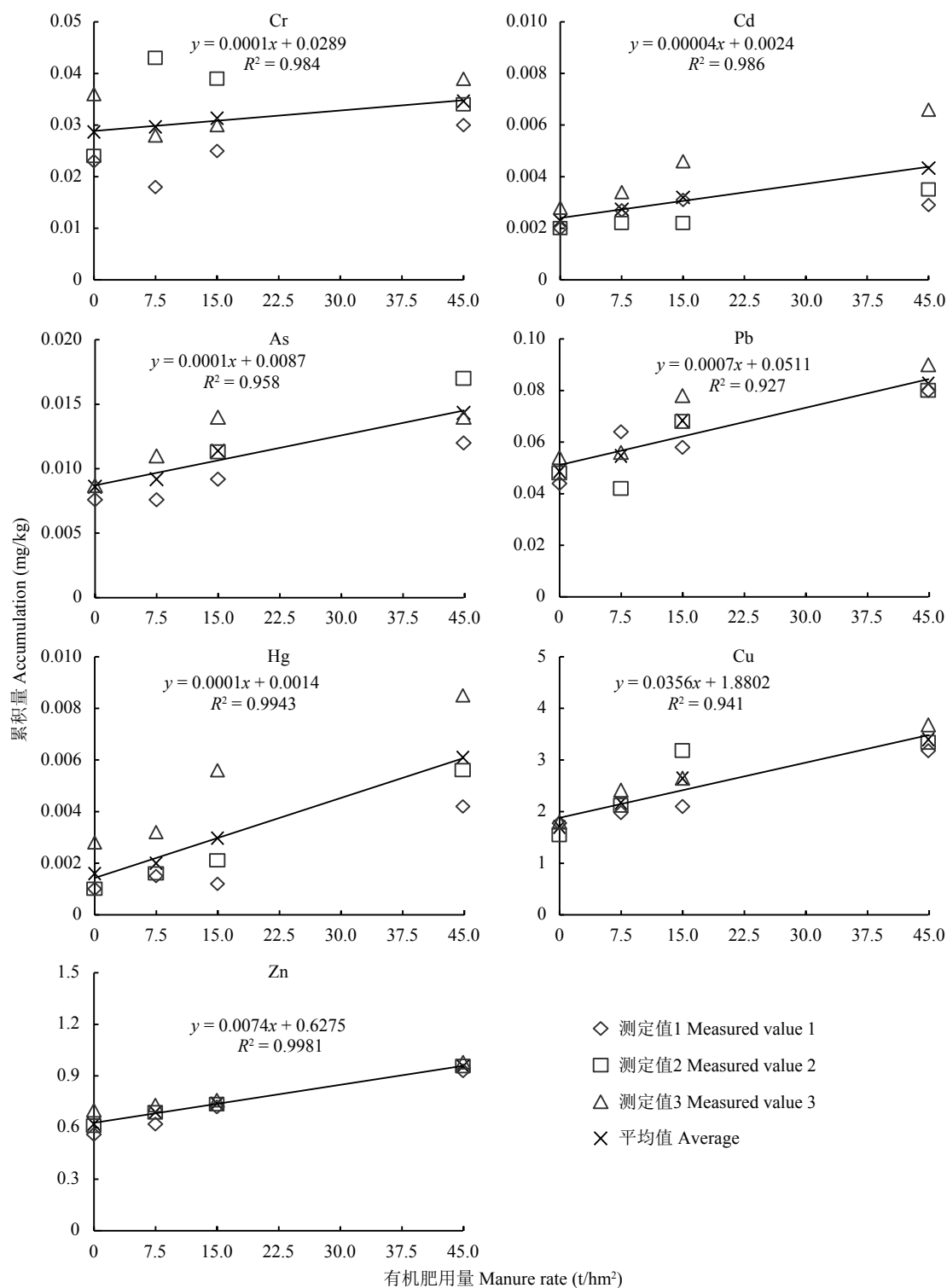


图2 葡萄中重金属累积量随有机肥施用量的变化

Fig. 2 Heavy metal accumulation in grapes as affected by manure application rates

果见表7, 如按照三种有机肥施肥模式继续施用, 土壤中重金属均会在未来达到限量。M3NPK 处理土壤中各重金属含量达到限量值所需年限最短, As 最先达到限量, M1NPK、M2NPK 和 M3NPK 处理所需年限分别为 129 年、69 年和 46 年。

3 讨论

有机肥富含有机质及多种果树所需的营养元素, 合理施用有机肥可以增加葡萄产量, 提高葡萄品质^[20-23], 并有效改善土壤微生态环境, 提高肥料的

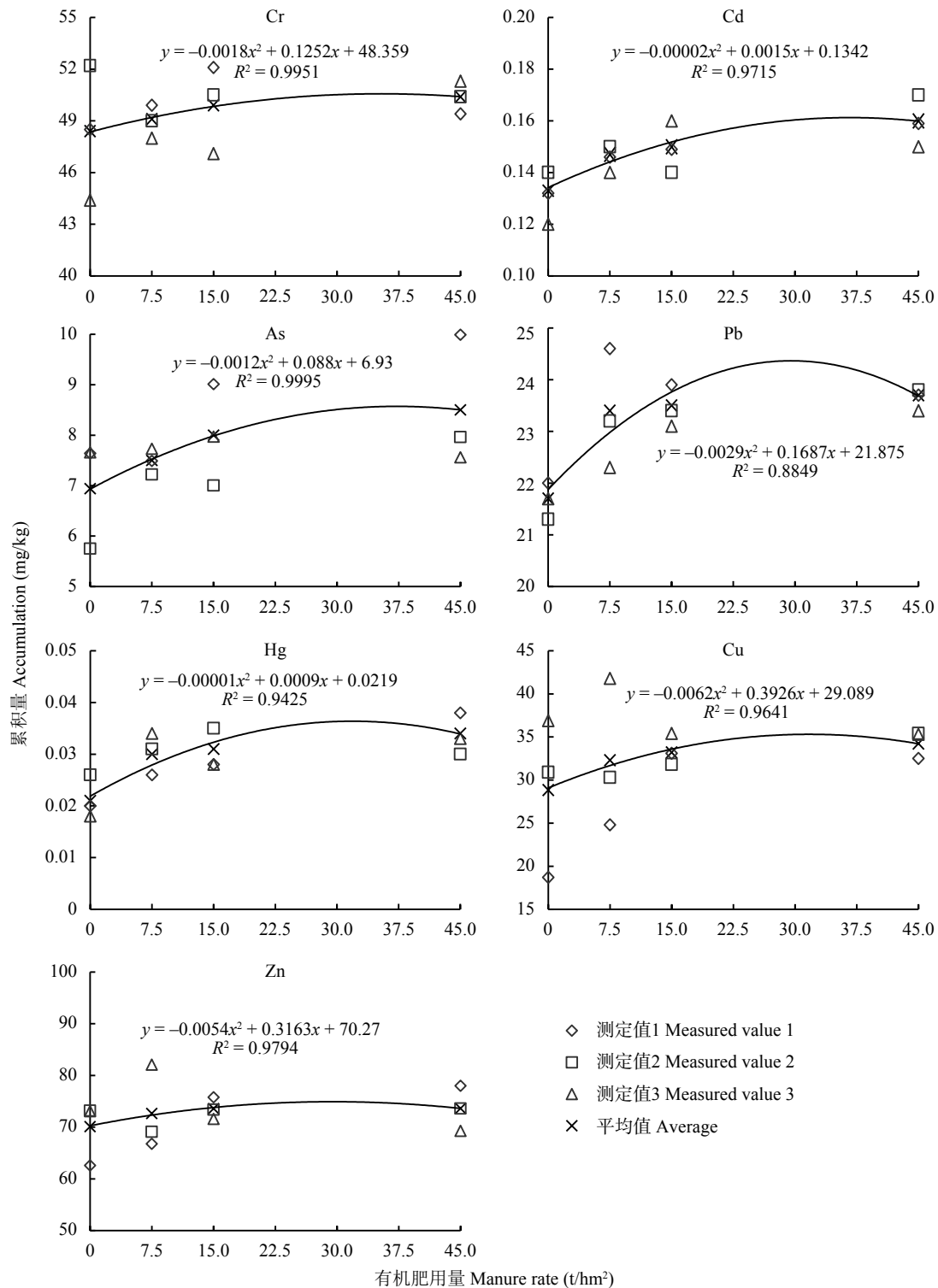


图3 土壤重金属累积随有机肥用量的变化

Fig. 3 Heavy metal accumulation in soil as affected by manure rate

利用率^[24-27]；而单一地施用化肥或过量地施用有机肥均会影响葡萄的产量和品质^[9, 28]。有研究表明，施用有机肥 15000 kg/hm² + 复合肥 750 kg/hm² 的效果明显高于单施复合肥的处理，葡萄长势明显增强，叶面积增大，果实可溶性固形物含量提高，品质得到

很大改善^[28]。本研究结果同样表明，有机肥 15000 kg/hm² + 尿素 318 kg/hm² + 复合肥 300 kg/hm² + 硫酸钾 357 kg/hm² 配施后，葡萄产量和品质均高于其它各处理，而单施化肥或有机肥、有机肥施用量过低或过高均不能使葡萄产量和品质达到最佳。

表 7 葡萄园土壤重金属达到限量所需年限 (a)
Table 7 Years required for heavy metals reaching the limit in vineyard soil

处理 Treatment	Cr	Cd	As	Pb	Zn	Cu	Hg
M1NPK	1152	140	129	135	470	—	363
M2NPK	550	112	69	130	405	—	265
M3NPK	403	70	46	113	309	—	263

不合理施肥是影响农田土壤氮素淋溶的重要因素之一^[29-30]。化肥肥效快, 但养分容易随着淋溶而进入地下水; 有机肥肥效时间长, 且微生物在矿化分解过程中消耗了土壤的部分氮素, 使土壤硝态氮累积量降低, 从而降低土壤氮素淋溶的风险^[31-33]。研究表明, 有机无机肥料配施可以有效降低深层土壤硝态氮累积量^[34]。本研究中, M2NPK 处理土壤中硝态氮含量在各土层分布最适宜, 2011—2013 年 0—20 cm 土层土壤硝态氮含量稳定在 16.89 mg/kg 左右, 2013 年 60—100 cm 土层土壤硝态氮平均含量较 2011 年降低了 1.44 mg/kg。既保证了对葡萄本身的氮素供应, 又降低了表层和深层硝态氮在土壤中的累积。但过量施用有机肥同样会带来环境问题, 由于葡萄体内能够吸收的氮素有限, 有机肥施用量过多时同样会导致大量的氮素在深层土壤中累积。唐政等^[35]在北京郊区的试验表明, 在有机肥施用量高的地区减半有机肥施用量, 能显著降低土壤中硝态氮累积量。王艳萍等^[14]对其它果园的研究也证实, 过量施用有机肥易导致硝态氮向根系之外的土壤中淋失。本研究中高量有机肥 + 化肥配施的土壤硝态氮含量在各土层均呈现出较高的累积量, 2012 年 M3NPK 处理 0—20 cm 土层土壤硝态氮为 29.19 mg/kg, 2013 年 60—100 cm 土层土壤硝态氮平均含量较 2011 年提高了 3.74 mg/kg。

土壤微生物量碳、氮是土壤肥力的重要评价标准^[36]。土壤微生物是土壤养分循环的推动力, 土壤中一系列过程均以碳、氮为中心^[37]。施用有机肥不仅可以增加土壤的有机碳源, 而且还会提高养分的有效性和保水能力, 大大提高土壤微生物的活性^[38]。李娟等^[39]通过 15 年的研究表明, 长期施用有机肥可显著提高土壤微生物量碳、氮含量。Zheng 等^[40]研究也得出相同结论, 与单施化肥相比, 施用有机肥可以显著提高土壤的微生物量碳、氮。但过量施用有机肥不仅不会显著提高土壤的微生物量碳、氮, 反而会有降低的趋势^[41]。本研究经过四年的试验得出, 土壤微生物碳、氮含量依次表现为中量有机肥 + 化肥 >

高量有机肥 + 化肥 > 低量有机肥 + 化肥 > 农民传统施肥 > 单施有机肥 > 单施化肥。

果园土壤环境质量是关系到果树的生长、结实以及果实品质, 土壤中重金属含量已经成为土壤环境质量的一项重要指标。由于饲料添加剂的使用, 目前我国的有机肥与之前相比重金属含量显著增加, 因此施用有机肥有给土壤带来重金属污染的风险^[42]。王美^[43]经过 20 多年的长期定位试验表明, 有机肥与化肥配施与单施化肥、不施肥相比, 显著提高了土壤中的重金属含量。刘赫等^[44]的长期定位试验同样表明, 施用有机肥显著增加了土壤中 Cd、Pb、Zn、Cu 的含量。虽然也有一些研究表明, 合理施用有机肥、无机肥及有机无机肥配施, 不会造成土壤和果实的重金属含量超标^[45], 但随着有机肥长时间的施用, 重金属污染可能会有所加强^[46]。随有机肥进入土壤的重金属会削弱有机质等养分对土壤的积极作用^[47]。长期施用有机肥并未引起土壤重金属超标, 是因为土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性等特点。但有机肥的施入可提高土壤重金属的有效态^[48]。从本研究同样可以看出, 随着有机肥施用量的增加, 葡萄及果园土壤中重金属含量呈现出累积趋势, 且二次相关方程系数都达到了极显著水平。Cu 与 Zn 不仅充当葡萄生长所需的微量元素, 同时作为重金属元素, 其适宜含量范围较窄, 在土壤和果实中随有机肥施入量增加的累积应引起重视。因此, 只有合理施用有机肥, 才能使葡萄在获得高产、优质的同时, 达到对果园土壤环境的友好。

4 结论

1) 有机肥可显著增加葡萄的产量和品质, 且随着施用年份的增加, 有机肥对葡萄产量和品质的提升趋势越来越明显。提质增效作用表现为: 有机肥与化肥配施 > 有机肥单施 > 化肥单施, 且以中量有机肥的效果较高。

2) 合理施用有机肥可以降低硝态氮在土壤中的累积, 显著增加土壤的微生物生物量碳、氮含量。

过高的鸡粪投入也会增加土壤中硝态氮含量。

3) 本试验条件下, 连续 4 年施用有机肥后, 葡萄及果园土壤的重金属含量 (Cr、Cd、As、Pb、Hg、Cu、Zn) 没有超过国家标准, 但是随着有机肥施用量的增加, 葡萄和土壤中的重金属含量分别呈现出线性和二次函数累积趋势, 随着种植年限的增加, 有机肥带来的重金属问题值得警惕。

参 考 文 献:

- [1] 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [2] Oliver D P, Bramley R G V, Riches D, *et al.* Review: soil physical and chemical properties as indicators of soil quality in Australian viticulture[J]. *Australian Journal of Grape & Wine Research*, 2013, 19(2): 129–139.
- [3] Jorge D, Hugo M C, Marta A C, *et al.* Vermicomposting grape marc yields high quality organic biofertiliser and bioactive polyphenols[J]. *Waste Management and Research*, 2014, 32(12): 1235–1240.
- [4] 王探魁, 张丽娟, 冯万忠, 等. 河北省葡萄主产区施肥现状调查分析与研究[J]. *北方园艺*, 2011, (13): 5–9.
Wang T K, Zhang L J, Feng W Z, *et al.* Present situation and research of fertilizer application on grape in main production regions of Hebei Province[J]. *Northern Horticulture*, 2011, (13): 5–9.
- [5] Arrobas M, Ferreira I Q, Freitas S, *et al.* Guidelines for fertilizer use in vineyards based on nutrient content of grapevine parts[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 172(3): 191–198.
- [6] 唐海龙. 有机肥与化肥配施对土壤环境质量影响的研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2012.
Tang H L. Research on the efficiency of organic and chemical fertilizers to soil environmental quality[D]. Tai'an: MS Thesis of Shandong Agricultural University, 2012.
- [7] 王孝娣, 蔡伟, 汪心泉, 等. 有机肥在红地球葡萄上的肥效对比试验[J]. *中外葡萄与葡萄酒*, 2005, (4): 24–27.
Wang X D, Qi W, Wang X Q, *et al.* Fertilizer efficiency of three organic manures on red globe grapevine[J]. *Sino-Overseas Grapevine Wine*, 2005, (4): 24–27.
- [8] 安胜, 郭春华, 孙晓春. 不同有机肥在京亚葡萄上的应用效果研究[J]. *中国林副特产*, 2012, 6(3): 26–27.
An S, Guo C H, Sun X C. Research on the application effect of different organic fertilizers on Jingya grape[J]. *Forest By-Product and Specialty in China*, 2012, 6(3): 26–27.
- [9] 韩晓日, 郑国砥, 刘晓燕, 等. 有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(4): 765–772.
Han X R, Zheng G D, Liu X Y, *et al.* Dynamics, sources and supply characteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(4): 765–772.
- [10] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(1): 63–74.
Wang M, Li S T, Ma Y B, *et al.* Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1): 63–74.
- [11] 叶荣生. 有机肥对柑橘营养及生长的影响[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2013.
Ye R S. Effects of organic fertilizers on nutrition and growth of citrus[D]. Chongqing: MS Thesis of Southwest University, 2013.
- [12] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 175–181.
Ning C C, Wang J W, Cai K Z. Research progress on the effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality[J]. *Ecological and Environment Science*, 2016, 25(1): 175–181.
- [13] 王探魁, 吉艳芝, 张丽娟, 等. 不同产量水平葡萄园水肥投入特点及其土壤-树体养分特征分析[J]. *水土保持学报*, 2011, (3): 136–141.
Wang T K, Ji Y Z, Zhang L J, *et al.* Characteristics of water and fertilizer inputs in different production levels vineyards and soil-tree nutrient characteristics analyses[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, (3): 136–141.
- [14] 王艳萍, 高吉喜, 刘尚华, 等. 有机肥对桃园土壤硝态氮分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1501–1505.
Wang Y P, Gao J X, Liu S H, *et al.* Effects of organic manure on the profile distribution of soil nitrate in a peach orchard[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1501–1505.
- [15] 汤民. 果园土壤Pb、Cd污染及其原位钝化研究[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2012.
Tang M. Study on pollution and in situ immobilization of Pb, Cd in orchard soil[D]. Chongqing: MS Thesis of Southwest University, 2012.
- [16] 贾文竹, 马利民, 卢树昌. 河北省菜地、果园土壤养分状况与调控技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007. 110–111.
Jia W Z, Ma L M, Lu S C. Vegetable field, orchard soil nutrient condition and control technology of Hebei Province[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007. 110–111.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
Bao S D. Analysis of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999.
- [18] Inubushi K, Brookes P C, Jenkinson D S. Soil microbial biomass C, N and ninhydrin-N in aerobic and anaerobic soils measured by the fumigation-extraction method[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(8): 737–741.
- [19] HJ/T332- 2006, 食用农产品产地环境质量评价标准[S].
HJ/T332- 2006, Environmental quality assessment criteria for producing edible agricultural products[S].
- [20] 汤小宁, 王德福, 张久慧, 等. 有机生态肥和钾肥对葡萄品质影响的研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 39(4): 570–571.
Tang X N, Wang D F, Zhang J H, *et al.* Research of the eco-organic fertilizer and potash fertilizer on grape quality[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2008, 39(4): 570–571.
- [21] 赵昌杰, 张强, 刘松忠, 等. 有机肥施用对葡萄园土壤特性及里扎马特葡萄产量、品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(1): 101–103.
Yang C J, Zhang Q, Liu S Z, *et al.* Effect of organic fertilizers on soil properties and yield, fruit quality of rizamat grape[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(1): 101–103.
- [22] 高英杰, 侯振安, 刘利鹏, 等. 不同有机肥对葡萄产量和品质的影响

- [J]. 新疆农垦科技, 2013, (9): 30–31.
- Gao Y J, Hou Z A, Liu L P, *et al.* Effects of different organic fertilizers on grape yield and quality[J]. *Xinjiang Agricultural Reclamation Technology*, 2013, (9): 30–31.
- [23] 孙少霞, 王旭涛, 李荣选, 等. 本达生物有机肥在玫瑰香葡萄上的施用效果[J]. *山西果树*, 2012, (4): 7–8.
- Sun S X, Wang X T, Li R X, *et al.* Application effect of benda bio-organic fertilizer on rose-scented grapes[J]. *Shanxi Fruit Tree*, 2012, (4): 7–8.
- [24] 郭洁. 有机物料对酿酒葡萄园土壤改良培肥效应及合理施用技术研究[D]. 银川: 宁夏大学硕士学位论文, 2013.
- Guo J. Study on organic materials for soil amendment's effect on improving soil and reasonable application of technology research in the vineyard[D]. Yinchuan: MS Thesis of Ningxia University, 2013.
- [25] 徐长寿. 商品有机肥对葡萄及土壤微生物的影响[J]. *现代农业科技*, 2011, (10): 110, 115.
- Xu C S. Effects of commercial organic fertilizers on grape and soil microorganisms[J]. *Modern Agricultural Technology*, 2011, (10): 110, 115.
- [26] Rahman L, Whitelaw-Weckert M A, Orchard B. Consecutive applications of brassica green manures and seed meal enhances suppression of *Meloidogyne javanica* and increases yield of *Vitis vinifera* cv Semillon[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(3): 195–203.
- [27] 卢树昌. 我国集约化果园养分投入特征及其对土壤质量的影响[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2009.
- Lu S C. Characteristics of nutrient input in intensive orchard in China and its effect on soil quality[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2009.
- [28] 张翔, 高长达, 李央群, 等. “巨峰”葡萄增施有机肥效应初报[J]. *中国园艺文摘*, 2011, 27(4): 16–17.
- Zhang X, Gao C D, Li Y Q, *et al.* Preliminary report on organic fertilizer effect of “jufeng” grape[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2011, 27(4): 16–17.
- [29] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1964–1972.
- Zhang L J, Ju X T, Zhang F S, *et al.* Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1964–1972.
- [30] 张丽娟, 巨晓棠, 刘辰琛, 等. 北方设施蔬菜种植区地下水硝酸盐来源分析——以山东省惠民县为例[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(21): 4427–4436.
- Zhang L J, Ju X T, Liu C C, *et al.* A study on nitrate contamination of ground water sources in areas of protected vegetables-growing fields—a case study in Huimin Country, Shandong Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(21): 4427–4436.
- [31] 汪涛, 朱波, 祝福虹, 等. 有机-无机肥配施对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(4): 781–788.
- Wang T, Zhu B, Kuang F H, *et al.* Effects of a combination of organic and inorganic fertilization on nitrogen leaching from purple soil with sloping cropland[J]. *Journal of Environmental Science*, 2010, 30(4): 781–788.
- [32] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 564–573.
- Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, *et al.* Effect of application of nitrogen fertilizer and incorporation of straw on nitrate leaching in farmland under wheat-maize rotation system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 564–573.
- [33] 刘杏认, 任建强, 刘建玲. 不同氮水平下有机肥碳氮比对土壤硝态氮残留量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(4): 30–32.
- Liu X R, Ren J Q, Liu J L. Effect of the manure with different C/N under different doses of N fertilizer on the content of soil NO_3^- [J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2006, 24(4): 30–32.
- [34] 庞凤梅. 有机无机肥料配施对麦田土壤氮挥发和硝态氮含量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2009.
- Pang F M. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil ammonia volatilization and nitrate accumulation in winter wheat field[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [35] 唐政, 邱建军, 邹国元, 等. 有机种植条件下水肥管理对番茄品质和土壤硝态氮累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 413–418.
- Tang Z, Qiu J J, Zou G Y, *et al.* Effects of different water and manure management practices on quality and yield of tomato and NO_3^- -N accumulations in soil profile[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(2): 413–418.
- [36] 绍兴方, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 326–335.
- Shao X F, Xu M G, Zhang W J, *et al.* Changes of soil carbon and nitrogen and characteristics of nitrogen mineralization under long-term manure fertilization practices in black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(2): 326–335.
- [37] Zhong W, Gu T, Wang W, *et al.* The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity[J]. *Plant & Soil*, 2010, 326(1–2): 511–522.
- [38] Jackson L, Calderson F J, Steenwerth K L S K M, *et al.* Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality[J]. *Geoderma*, 2003, 114: 305–317.
- [39] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 144–152.
- Li J, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 144–152.
- [40] Zheng Y, Gao Y S, Zhang L M, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microorganisms and enzyme activities in an upland red soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 316–321.
- [41] 张明, 白震, 张威, 等. 长期施肥农田黑土微生物量碳、氮季节性变化[J]. *生态环境*, 2007, 16: 1498–1503.
- Zhang M, Bai Z, Zhang W, *et al.* Seasonal change of the long-term fertilization on microbial biomass C and N of arable Mollisol[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2007, 16: 1498–1503.
- [42] 程旭艳, 王定美, 乔玉辉, 等. 中国商品有机肥重金属分析[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(2): 72–76.
- Cheng X Y, Wang D M, Qiao Y H, *et al.* Analyze on the heavy metals content in China commodity organic fertilizer[J].

- [Environmental Pollution & Control](#), 2012, 34(2): 72–76.
- [43] 王美. 长期施肥对土壤及作物产品重金属累积的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2014.
- Wang M. Effects of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [44] 刘赫, 李双异, 汪景宽. 长期施用有机肥对棕壤中主要重金属积累的影响[J]. [生态环境学报](#), 2009, 18(6): 2177–2182.
- Liu H, Li S Y, Wang J K. Effects of long-term application of organic manure on accumulation of main heavy metals in brown earth[J]. [Ecology and Environmental Sciences](#), 2009, 18(6): 2177–2182.
- [45] 赵明, 蔡葵, 孙永红, 等. 不同施肥处理对番茄产量品质及土壤有效态重金属含量的影响[J]. [农业环境科学学报](#), 2010, 29(6): 1072–1078.
- Zhao M, Cai K, Sun Y H, *et al.* Influence of organic and chemical fertilizers on tomato yield, quality, and the content of available heavy metals in soil[J]. [Journal of Agro-Environment Science](#), 2010, 29(6): 1072–1078.
- [46] 朱海生, 左福元, 周沛, 等. 有机肥施用对土壤养分和重金属含量的影响[J]. [黑龙江畜牧兽医](#), 2014, (9): 203–205.
- Zhu H S, Zuo F Y, Zhou P, *et al.* Effects of organic fertilizer application on the soil nutrients and contents of heavy metals[J]. [Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine](#), 2014, (9): 203–205.
- [47] 林辉, 孙万春, 王飞, 等. 有机肥中重金属对菜田土壤微生物群落代谢的影响[J]. [农业环境科学学报](#), 2016, 35(11): 2123–2130.
- Lin H, Sun W, Wang F, *et al.* Effects of heavy metal within organic fertilizers on the microbial community metabolic profile of a vegetable soil after land application[J]. [Journal of Agro-Environment Science](#), 2016, 35(11): 2123–2130.
- [48] 曹庆军, 杨粉团, 姜晓莉, 等. 长期施用有机肥对农田土壤重金属污染的影响[A]. 中国作物学会. 第十五届全国玉米栽培学术研讨会会议论文集[C]. 北京: 中国作物学会, 2017.
- Cao Q J, Yang F T, Jiang X L, *et al.* Effects of long-term application of organic fertilizers on heavy metal pollution in farmland soil[A]. The Crop Science Society of China. National academic symposium on maize cultivation[C]. Beijing: The Crop Science Society of China, 2017.