doi：10.11838/sfsc.1673-6257.20079

生物炭输入对砾石土水肥保蓄及酿酒葡萄产量、品质的影响

纪立东，司海丽，李　磊，杨　洋

（宁夏农林科学院农业资源与环境研究所，宁夏　银川　750002）

摘　要：为了探讨有机无机配施条件下，生物炭输入对砾石土水分养分保蓄及酿酒葡萄产量品质的调节作用，在贺兰山东麓开展了2年定位试验，分析了不同用量生物炭输入条件下土壤理化性质及作物生物学响应。结果表明：有机无机配施条件下，随着生物炭施用量的增加，>0.25 mm粒径水稳性团聚体含量显著升高，<0.25 mm粒径水稳性团聚体含量显著降低，土壤结构明显改善；生物炭施用量6000 kg/hm^{2}以上，可显著提高土壤0 ~ 80 cm土体贮水量超过30%，显著提高土壤有机质、碱解氮和速效钾含量；并且显著促进酿酒葡萄叶片的光合作用，优化了果穗长，进而提高了葡萄产量，改善了葡萄品质，基于理论产量模拟最佳生物炭输入量为7260 kg/hm^2。因此，贺兰山东麓砾石土酿酒葡萄园，在有机无机配施条件下，补施生物炭7260 kg/hm^{2}可快速构建土体，保蓄土壤水分养分，有利于推进酿酒葡萄产业健康可持续发展。

关键词：酿酒葡萄；砾石土；生物炭；水稳性团聚体；水分贮量；产量

宁夏贺兰山东麓位于世界酿酒葡萄种植北纬38°的最佳地段，西倚贺兰山天然屏障抵御寒流，东临黄河上游调节气候，得天独厚的地理位置为酿酒葡萄栽培创造了良好的条件[1]。然而，贺兰山东麓地区土壤多为砾石土或沙土，土壤结构差、保肥保水能力弱，养分有效性低，已成为制约宁夏酿酒葡萄产业发展的“瓶颈”，严重影响到酿酒葡萄产业的经济效益和社会效益[2]。众所周知，高质量的葡萄酒70%的决定因素来源于原料，而只有合理的水肥供应才可为优质酿酒葡萄栽培提供保障，同时也可以提高酿酒葡萄品质，改善生态环境[3-5]。目前，有机无机配施已是各种作物成熟高效的施肥技术模式，但应用于贺兰山东麓酿酒葡萄砾石土土壤条件下，存在水分供应不足易导致有机肥分解条件不满足、发挥作用缓慢、养分流失等问题，水分养分保蓄和土体快速构建成为贺兰山东麓酿酒葡萄砾石土产区急需解决的问题。

生物炭在农业上的应用研究一直备受人们关注，陈温福等[6]明确指出，生物炭具有含碳率高、孔隙结构丰富、比表面积大、理化性质稳定等固有特点；同时生物炭施用可提高土壤氮、磷有效成分，促进植株生长，还可减少二氧化碳和甲烷等温室气体的排放，减缓全球变暖[7-11]。张忠河等[12]研究发现适当的生物炭施用量可以提高作物产量，过高反而会降低作物产量[13]；袁晶晶等[14]研究发现生物炭与氮肥配合施用对华北平原枣区的土壤养分吸收、土壤质量和红枣产量及品质起到了积极作用；王玫等[15]研究发现施用生物炭复合有机肥相比于单施生物炭或者有机肥，能更好地提高连作条件下平邑甜茶幼苗的生长发育，增强土壤酶活性；由此可见，合理使用生物炭，有助于促进农业经济快速、安全、绿色发展。尽管围绕生物炭的应用开展了大量的研究工作，但研究方向多集中于无机肥和生物炭配施，生物炭和秸秆还田、有机肥配施等措施效应，而有机无机配施条件下，生物炭如何发挥作用，有机无机及生物炭的协同效应缺乏相关研究。本研究基于宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄砾石土产区土壤漏水漏肥、有机肥显效水分条件不足等问题，在有机无机配施条件下，开展不同生物炭输入效应研究，探讨提出砾石土高效保水施肥技术，以期为贺兰山东麓酿酒葡萄优质高产提供理论与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验在宁夏志辉酒庄葡萄基地进行，该地区

收稿日期：2020-02-22；**录用日期：**2020-04-02

基金项目：宁夏自然基金项目（NZ16110）；宁夏农林科学院科技创新先导资金项目（NKYG-17-01）；宁夏农林科学院全产业链创新示范项目（QCYL-2018-09）；宁夏重点研发计划（2017BN05）。

作者简介：纪立东（1980-），男，宁夏中宁人，副研究员，硕士，主要从事水肥资源高效利用及废弃物资源化利用等研究。E-mail：jili521010@163.com。

位于“贺兰山东麓葡萄酒原产地域”的核心区域，属温带大陆性半干旱气候，全年累积日照时数高达2800 h以上，昼夜温差大，有效积温1534.9℃左右；年均气温8.8℃左右，最热月平均气温基本保持在22 ~ 23℃之间；年均降水量在180 ~ 200 mm之间。

1.2　供试材料

供试葡萄为当地主栽欧亚品种（*Vitis vinifera* L.）赤霞珠（*Cabernet Sauvignon*），试验2015年布设时是3年生植株，连续布设试验2年，2016年数据采集当年为4年生植株。

供试生物炭购自河南商丘三利生物能源有限公司，来源为小麦秸秆；其pH 9.4、有机碳含量467 g/kg、全氮含量5.6 g/kg、灰分含量20.8%、阳离子交换量24.1 cmol/kg、比表面积8.9 m^2/g。供试有机肥为商品羊粪有机肥，有机质≥45%，$N+P_2O_5+K_2O$ ≥ 5%。

1.3　供试土壤

试验区成土母质以冲积物为主，地貌为冲积倾斜平原，地形平坦，土壤侵蚀较重。土壤类型为干旱土土纲，淡灰钙土，砾石含量高，田间持水量较低，容重较高，超过1.6 g/cm^3。土壤呈碱性，有机质含量低，碱解氮为6级水平，属极缺状态，有效磷稍缺，属4级水平，速效钾为稍缺，属4级水平，整体肥力水平低。土壤物理化学性质详见表1、表2。

表1　2015年试验布设前土壤基本物理性质

土层深度（cm）	容重（g/cm^3）	自然含水量（%）	田间持水量（%）	总孔隙度（%）	饱和含水量（%）
0 ~ 20	1.62	9.56	14.35	38.19	31.44
20 ~ 50	1.69	11.50	14.21	40.50	29.60
50 ~ 80	1.65	13.41	15.70	39.51	35.68

表2　2015年试验布设前土壤基本化学性质

土层深度（cm）	pH	全盐（g/kg）	有机质（g/kg）	碱解氮（mg/kg）	有效磷（mg/kg）	速效钾（mg/kg）
0 ~ 20	8.86	0.33	3.67	14.66	20.35	96.28
20 ~ 50	8.98	0.34	4.96	22.62	31.26	110.64
50 ~ 80	8.89	0.36	7.88	31.20	33.72	125.31

1.4　试验设计

试验于2015、2016年连续布设2年，2016年采集检测数据。采用单因素多水平设计，以生物炭（Biochar，简称BC）为主因子，设计5个处理，分别为CK：不施生物炭；有机肥施用量为6000 kg/hm^2，一次性基施；在葡萄关键生育期滴施化肥4次（展叶期1次、果实膨大期2次、果实着色期1次），化肥为$N:P_2O_5:K_2O$=19.5∶7.5∶9。处理1：T1，生物炭施用量1500 kg/hm^2，一次性基施；有机肥、化肥施用量及方法同CK。处理2：T2，生物炭施用量3000 kg/hm^2，一次性基施；有机肥、化肥施用量及方法同CK。处理3：T3，生物炭施用量6000 kg/hm^2，一次性基施；有机肥、化肥施用量及方法同CK。处理4：T4，生物炭施用量12000 kg/hm^2，一次性基施；有机肥、化肥施用量及方法同CK。

每个处理整行设计，随机区组布置，每行（长 × 宽）110 m × 4 m=440 m^2，合计2640 m^2，每行11个杆空，具体监测中以临近路边杆空作为保护行，其后以3个杆空（30株树）作为一个重复小区展开试验监测。施肥方法为沿行向、距离主杆25 cm开外，机械开沟20 cm，深度50 cm，均匀撒入有机肥及生物炭，机械回土搅匀，使土和肥均匀混合后填土，一次性施入。统一水肥一体化管理，配套文丘里施肥器，灌水量通过水表精确控制；田间其他管理同大田。

1.5　测定项目及方法

1.5.1　土壤理化性质的测定

施肥前选取代表性地段，朝阳方向挖取1 m剖面，采取分析样，标签纸标记，采用TTF-100型土壤团粒分析仪测定土壤水稳定性团聚体[16]；土壤理化指标采用常规方法测定[17]。

1.5.2　土壤水分含量及土壤贮水量的测定

每个处理预埋3根1 m长探管，采用时域反射技术（TDR）按时监测不同处理下不同层次土壤含水量。

土壤贮水量计算方法：$W=h\times\gamma\times\theta\times10$；其中：$W$为土壤贮水量（mm）；$h$为土层深度（cm）；$\gamma$为土壤容重（g/$cm^3$）；$\theta$为土壤水分含量（%）。

1.5.3　叶片光合特性的测定

在酿酒葡萄关键生育期（花期、初果期、膨大期），选取30棵植株在同一位置固定部位标记叶片，采用美国CI-340手持光合测量系统进行测定；测定时间为9：00 ~ 11：00，主要测定指标包括：净光合速率（Pn）、蒸腾速率（E）、气孔导度（C）和胞间CO_2浓度（Int CO_2），通过Pn/E值，估算叶片水分有效利用率。

1.5.4　叶片酿酒葡萄形态指标及产量的测定

酿酒葡萄成熟期随机选取30粒，用电子天平

称量，重复 3 次测定，求得平均单粒重，用游标卡尺量取横、纵径，求得平均数；用直尺测定果穗长；产量通过实际测定，求得小区产量，最后折算理论产量。

1.5.5　酿酒葡萄品质的测定

每个处理行随机选取生长势一致的 10 棵植株，每棵植株选取同一方向的果穗并采摘中部果粒 30 粒用搅拌机打成匀浆测定品质。手持糖量计测定果实可溶性固形物含量；NaOH 滴定法测定果实与葡萄酒可滴定酸含量（以酒石酸计）；3，5–二硝基水杨酸法测定果实还原糖含量[18]；部分指标如单宁、花色苷、总酚则需要用液氮保存 24 h 后测定。福林 – 丹尼斯法测定单宁含量，福林 – 肖卡法测定总酚含量，pH 示差法测定花色苷含量[19–21]。

1.6　数据分析方法

试验数据以 Excel 2003 软件整理数据和作图，采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析，并对相关性指标进行显著性检验，显著性水平为 $P<0.05$，$n=5$。

2　结果与分析

2.1　不同生物炭施用量对砾石土水稳性团聚体含量的影响

由图 1 所示，0 ~ 30 cm 层次，随着生物炭施用量的增加，<0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量表现出逐渐降低的趋势，不同处理之间，CK 和 T1 之间差异不显著，T2 和 T3 之间差异不显著，T4 同比其他处理达到显著差异水平；>0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量表现出逐渐增加的趋势，其中 0.25 ~ 2 mm 粒径水稳性团聚体含量同比 CK 达到显著差异水平，但不同处理间差异不明显；>2 mm 粒径水稳性团聚体含量表现出显著增加的趋势，处理 T4 同比 CK 提高 36.08%；相比 CK，施用生物炭显著增加了 1 ~ 2 mm 粒径水稳性团聚体含量。30 ~ 60 cm 层次，随着生物炭施用量的增加，<0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量表现出显著降低的趋势，处理 T1 和 T2 之间差异不显著，但同比 CK 各处理都达到显著差异水平；>0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量总体表现出逐渐增加的趋势，其中 >2 mm 粒径水稳性团聚体含量表现出先增加后降低的趋势，不同处理以 T2 和 T3 表现最佳，T4 显著降低；而 0.25 ~ 2 mm 粒径水稳性团聚体含量表现出持续增加的趋势。表明有机无机配施条件下，生物炭输入具有明显提高土壤水稳性大团聚体含量、降低土壤水稳性小团聚体含量、维护土壤稳定性的作用。

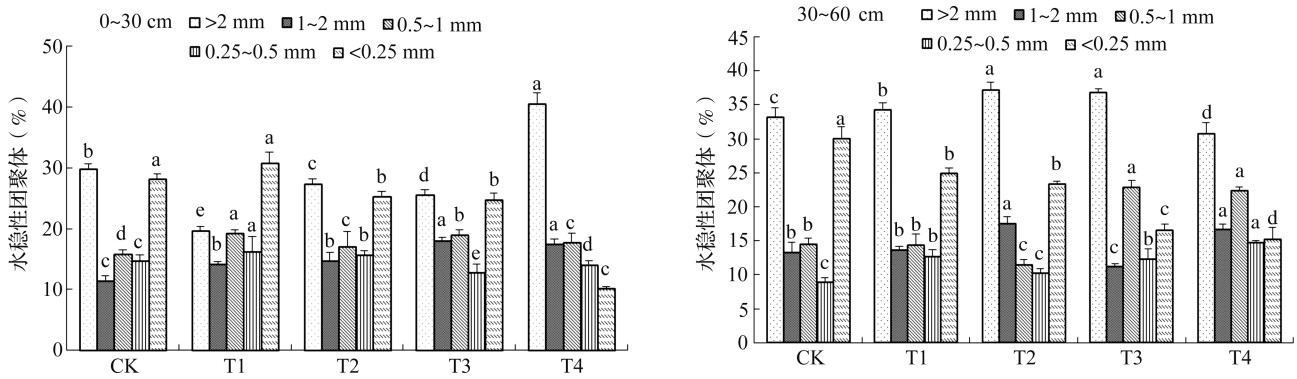

图 1　不同生物炭用量对 0 ~ 60 cm 土壤水稳性团聚体含量的影响

注：不同字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。

2.2　不同生物炭施用量对不同生育期土壤含水量的影响

图 2 可知，生物炭输入对酿酒葡萄不同生育期不同层次土壤含水量保蓄具有明显促进作用。花期不同处理土壤含水量在 30 ~ 50 cm 层次变化梯度较为明显，而在土壤层次 50 cm 下出现交叉现象，和生物炭施用集中在 20 ~ 50 cm 层次直接相关，有限的灌水量淋洗条件下，50 cm 以下层次生物炭渗入量少，水分保蓄作用没有体现出来。初果期以后，土壤含水量在不同层次之间表现出逐渐增加的趋势；不同处理之间，同比 CK，随着生物炭施用量的增加，土壤含水量明显增加。表明有机无机配施条件下，输入生物炭具有保蓄砾石土土壤水分、提高土壤含水量的作用，且随着生物炭输入量的增加，土壤含水量越高，保蓄水分能力越强。

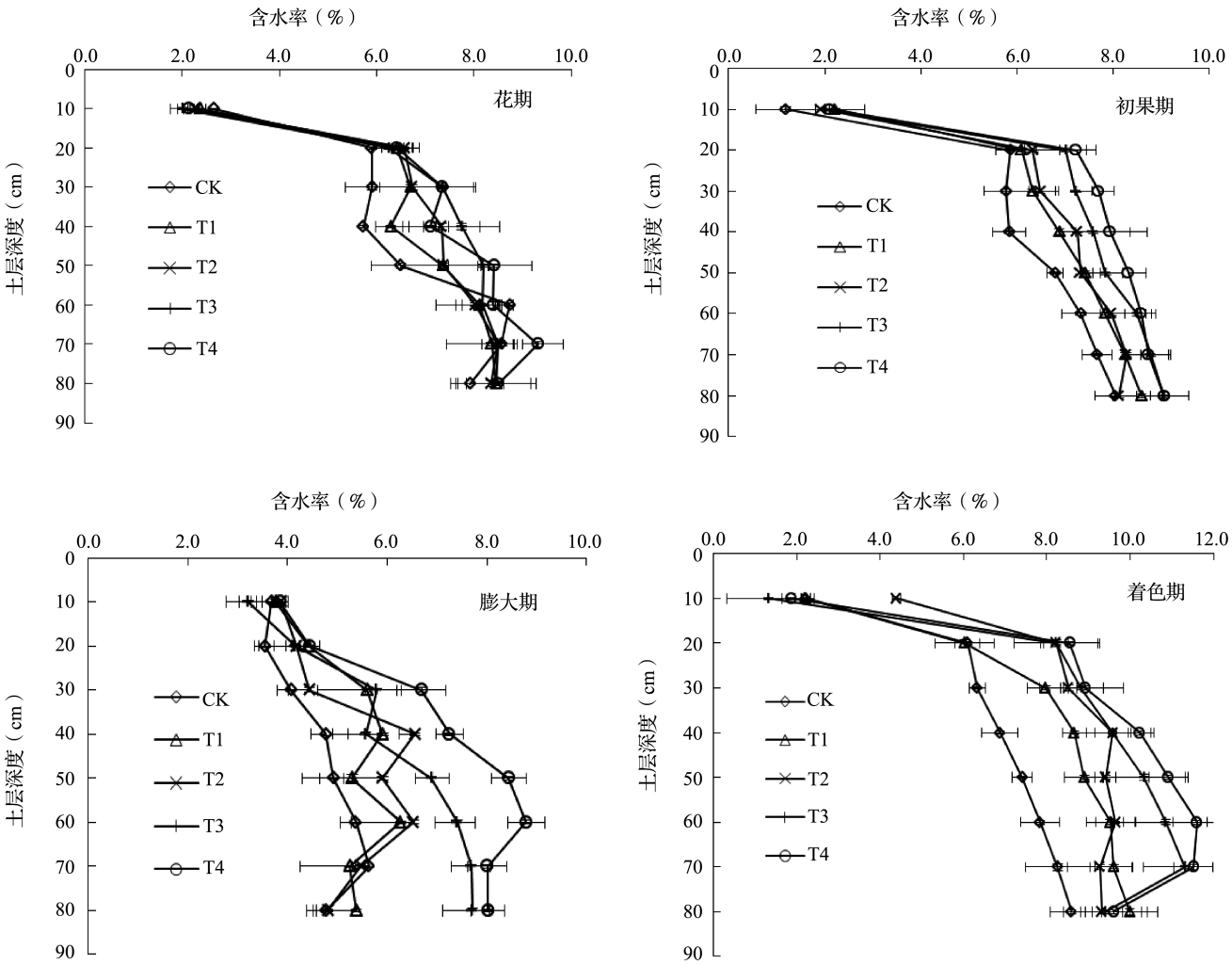

图 2　不同生物炭用量对不同生育期土壤含水量的影响

随着生物炭施用量的增加，土壤 0 ~ 80 cm 土层贮水量在不同生育期表现出逐渐增大的趋势。与 CK 相比，不同用量生物炭显著增加了土壤贮水量，不同生育期以着色期表现最优，不同生物炭施用量土壤 0 ~ 80 cm 土层贮水量同比 CK 分别增加了 17.43%、27.46%、30.39%、36.67%，可能是着色期雨季降水的大量补充和生物炭保蓄水分能力充分发挥的结果；不同处理之间以处理 T4 土壤贮水量最大。表明砾石土输入生物炭具有保蓄土壤水分、提高土壤贮水量、调节葡萄水分供给的作用，且生物炭施用量和土壤贮水量成正比（图 3）。

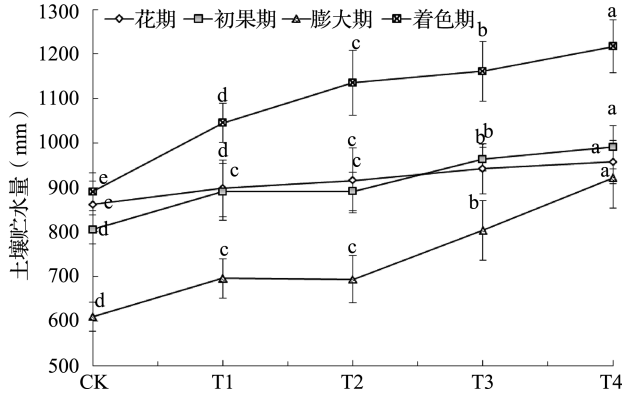

图 3　不同生物炭用量对土壤 0 ~ 80 cm 土层贮水量的影响

注：不同字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。

2.3　不同生物炭施用量对酿酒葡萄叶片光合特性的影响

表 3 可知，综合生育期来说：初果期净光合速率明显高于膨大期、花期，花期净光合速率最低，随着生物炭施用量的增加净光合速率在各生育期均表现为先增加后降低的趋势。花期酿酒葡萄叶片净光合速率在施用量为 6000 kg/hm^2 时达到最高，同时提高蒸腾速率，通过 Pn/E 显示出该处理下水分有效利用率最高；此外，气孔导度也达到最大，加速光合作用有序进行；初果期净光合速率在生物炭施用量为 6000 kg/hm^2 时达到最高，与生物炭施用

量为 3000 kg/hm^2 相差不大，该处理下气孔导度相比花期增加 3 倍以上；膨大期生物炭施用量为 12000 kg/hm^2 时净光合速率相比施用量为 6000 kg/hm^2 降低了 22.04%，蒸腾速率相差不大，同时水分有效利用率降低。说明有机无机配施条件下，生物炭施入具有提高葡萄叶片净光合速率的作用，不同处理以 T3 表现最佳，高量施用生物炭通过保水导致水分奢侈供应，反而抑制了葡萄叶片水分利用效率。

表 3　不同生物炭用量对葡萄叶片光合特性的影响

生育期	处理	净光合速率［μmol/（m^2·s）］	蒸腾速率［mmol/（m^2·s）］	水分有效利用率（μmol/mmol）	气孔导度［mmol/（m^2·s）］	胞间 CO_2 浓度（mg/kg）
花期	CK	9.60 ± 0.33a	3.11 ± 0.06a	3.09 ± 0.13a	81.09 ± 4.73ab	80.55 ± 2.94bc
	T1	8.31 ± 0.15bc	2.95 ± 0.03a	2.82 ± 0.08a	64.93 ± 2.73c	72.45 ± 1.96c
	T2	7.69 ± 0.33c	2.93 ± 0.41a	2.62 ± 0.29a	62.99 ± 2.64c	130.45 ± 7.83a
	T3	10.35 ± 0.60a	3.25 ± 0.08a	3.18 ± 0.14a	87.98 ± 6.70a	88.80 ± 5.16b
	T4	8.42 ± 0.62bc	3.12 ± 0.08a	2.69 ± 0.14a	70.20 ± 1.01b	87.25 ± 1.15bc
初果期	CK	18.59 ± 2.37b	8.30 ± 0.22b	2.24 ± 0.23bc	110.73 ± 0.80d	90.00 ± 2.47d
	T1	18.62 ± 2.57b	8.96 ± 0.97ab	2.08 ± 0.07c	237.56 ± 12.74c	129.20 ± 3.92b
	T2	24.10 ± 1.94ab	9.33 ± 0.49ab	2.58 ± 0.20ab	271.49 ± 8.24b	106.10 ± 4.6cd
	T3	25.53 ± 1.65a	8.75 ± 0.29b	2.92 ± 0.10a	276.52 ± 4.93b	117.10 ± 8.79bc
	T4	18.86 ± 0.58b	10.91 ± 0.85a	1.74 ± 0.08b	310.42 ± 9.96a	209.00 ± 8.27a
膨大期	CK	15.91 ± 0.69ab	4.71 ± 0.10b	3.38 ± 0.12a	154.07 ± 13.06a	122.65 ± 1.81b
	T1	16.53 ± 0.50a	6.16 ± 0.48a	2.71 ± 0.17b	177.97 ± 8.20a	178.95 ± 2.71a
	T2	15.76 ± 0.33ab	5.72 ± 0.14a	2.76 ± 0.12b	163.55 ± 9.28a	179.55 ± 5.53a
	T3	17.65 ± 0.85a	6.18 ± 0.10a	2.85 ± 0.09b	172.67 ± 10.23a	136.85 ± 8.75b
	T4	13.76 ± 0.91b	6.11 ± 0.07a	2.25 ± 0.13c	161.22 ± 2.61a	86.75 ± 8.04c

注：同列数据后小写字母不同表示处理间差异显著（P<0.05）。下同。

2.4　不同生物炭施用量对酿酒葡萄形态指标及产量的影响

由表 4 可得，有机无机配施基础上输入生物炭对酿酒葡萄形态指标影响较大，尤其生物炭施用量为 6000 kg/hm^2 时显著增加果穗长，而生物炭对单粒重无显著性影响，从而增加果穗重，相比生物炭施用量为 0、1500、3000、12000 kg/hm^2 的处理分别增加了 39.47%、32.21%、7.02%、5.42%；粒径在不同生物炭施用量下表现差异较大，生物炭施用量为 6000 kg/hm^2 时显著增加果实粒径，相比不施生物炭增加 15.10%。

表 4　不同生物炭用量对葡萄形态指标的影响

处理	果穗长（cm）	果穗重（g）	单粒重（g）	粒径（mm）	产量（kg/hm^2）
CK	12.00 ± 0.45bc	109.23 ± 16.01c	1.39 ± 0.00a	11.12 ± 0.21c	4281 ± 393c
T1	10.72 ± 0.26c	115.23 ± 13.70c	1.34 ± 0.01a	12.05 ± 0.24ab	4716 ± 138bc
T2	13.87 ± 0.31ab	142.35 ± 4.02b	1.30 ± 0.02a	11.98 ± 0.68b	4608 ± 459c
T3	15.42 ± 0.85a	152.35 ± 8.83a	1.33 ± 0.00a	12.80 ± 1.23a	5925 ± 252a
T4	13.75 ± 1.23ab	144.52 ± 12.21b	1.36 ± 0.01a	12.22 ± 0.05ab	5256 ± 293ab

生物炭施用量为 6000 kg/hm^2 时，酿酒葡萄产量最高，达到 5925 kg/hm^2，相比生物炭施用量为 0、1500、3000、12000 kg/hm^2 的处理分别增加了 38.40%、25.63%、28.58%、12.72%。由此可见，适宜的生物炭投入有助于协调投入碳氮的比例，通过增加养分和改善土壤理化性质，可以促进作物地上部干物质的积累，使养分向籽粒充分转运。

通过对生物炭不同施用量与酿酒葡萄产量模拟，二者关系可由以下方程表达：

即：$y = -0.0004x^2+0.3872x+275.83$　$R^2 = 0.7826$

方程式表明：生物炭施用量与产量关系符合肥料效应的报酬递减规律，当 dy/dx=0 时，得出酿酒葡萄最高产量时生物炭施用量为 7260 kg/hm^2，理论计算结果与田间试验测定值比较接近。

2.5　不同生物炭施用量对酿酒葡萄鲜果品质的影响

由表 5 可得，有机无机配施基础上，输入生物炭可提高酿酒葡萄果实可溶性固形物含量，尤其生物炭施用量为 6000 kg/hm^2 处理下显著增加可溶性固形物含量，相比 CK 增加 4.80%；同时该处理下显著增加还原糖含量，与生物炭施用量为 12000 kg/hm^2 处理无显著性差异；可滴定酸含量在不同生物炭处理下表现出较为明显的差异，施用生物炭的处理显著降低可滴定酸含量，尤其在施用量为 12000 kg/hm^2 处理下可滴定酸相比不施生物炭处理降低 33.71%；生物炭施用量为 6000 kg/hm^2 处理提高总酚含量，显著高于不施生物炭及生物炭施用量为 1500 kg/hm^2 的处理，分别增加了 65.40%、30.23%；花色苷在生物炭施用量为 3000、6000 kg/hm^2 的处理下含量较为相近；单宁在各处理下变异较大，生物炭施用量为 6000 kg/hm^2 处理下降低单宁含量，有效地改善酿酒葡萄的品质和口感。表明有机无机配施条件下施入生物炭，对酿酒葡萄品质提升具有明显的促进作用。

表 5　不同生物炭用量对葡萄品质的影响

处理	可溶性固形物（%）	可滴定酸（%）	还原糖（%）	总酚（mg/g）	花色苷（mg/g）	单宁（mg/g）
CK	25.00 ± 1.05bc	0.89 ± 0.01a	20.90 ± 1.06c	7.37 ± 0.24c	0.69 ± 0.00c	47.04 ± 4.25a
T1	24.10 ± 2.23c	0.70 ± 0.01b	22.20 ± 0.23b	9.36 ± 0.38b	0.68 ± 0.00c	39.51 ± 1.85b
T2	25.40 ± 1.08b	0.68 ± 0.01b	21.20 ± 0.96c	11.38 ± 0.09ab	0.95 ± 0.01a	38.71 ± 1.24b
T3	26.20 ± 0.23a	0.69 ± 0.03b	23.30 ± 0.08a	12.19 ± 0.14a	0.94 ± 0.01a	33.24 ± 2.11c
T4	26.00 ± 0.88ab	0.59 ± 0.02c	23.20 ± 0.49a	11.44 ± 0.15ab	0.90 ± 0.02b	39.44 ± 2.36b

2.6　不同生物炭施用量对土壤化学性质的影响

与 CK 相比，有机无机肥配施条件下，输入生物炭显著提高了土壤 pH 值和全盐含量，但不同处理之间差异不显著，由于生物炭本身 pH 值和盐分含量高，生物炭的投入即是盐碱的摄入；输入生物炭显著提高了土壤有机质含量，但处理 T2、T3、T4 之间差异不显著，同比 CK 增幅分别为 12.17%、24.17%、27.82%；输入生物炭显著提高了土壤碱解氮含量，不同处理间 T3 和 T4 差异不显著，但同比其他处理达到显著差异水平；输入生物炭显著提高了土壤速效钾含量，可能和生物炭本身含有大量的速效性钾直接相关，但不同处理之间 T1 和 T2 差异不显著，T3 和 T4 差异不显著，处理间以 T3 速效钾含量最高，同比 CK 增幅为 54.01%。生物炭输入对土壤有效磷含量的影响规律不明显。表明有机无机配施条件下，输入生物炭显著增加了土壤盐碱含量，但同时显著提升了土壤有机质、碱解氮和速效钾含量，表现出保蓄氮素、补益钾素的积极作用，有效提升了土壤肥力水平。

表 6　不同生物炭用量对土壤化学性质的影响

处理	pH	全盐（g/kg）	有机质（g/kg）	碱解氮（mg/kg）	有效磷（mg/kg）	速效钾（mg/kg）
CK	8.75 ± 0.06b	0.50 ± 0.02b	5.75 ± 0.22c	33.60 ± 1.60c	32.34 ± 1.61b	93.5 ± 8.5c
T1	8.98 ± 0.04a	0.67 ± 0.02ab	6.23 ± 0.20b	35.62 ± 3.55c	36.49 ± 1.70ab	115.5 ± 7.0b
T2	9.02 ± 0.05a	0.70 ± 0.03a	6.45 ± 0.44ab	40.58 ± 2.50b	35.56 ± 1.38ab	123.5 ± 2.0b
T3	9.15 ± 0.09a	0.71 ± 0.03a	7.14 ± 0.27a	48.64 ± 1.22a	39.20 ± 2.86ab	144.0 ± 9.5a
T4	9.21 ± 0.11a	0.79 ± 0.03a	7.35 ± 0.34a	50.40 ± 1.47a	42.53 ± 3.56a	137.0 ± 11.5a

3　讨论

3.1　不同生物炭配施方式对土壤团聚体及保水性的影响

生物炭本身富含大量纳米孔隙，通过与化肥、有机物料间的相互作用，对土壤团聚体形成具有明显的促进作用。林洪羽等[22]研究提出生物炭和氮磷钾配施能降低大团聚体（>2 mm）和微团聚体（<0.053 mm）的含量，且显著提高团聚体平均

重量直径、几何平均直径及稳定率，有利于提高团聚体结构稳定性；李鑫等[23]研究发现秸秆生物炭与猪粪配施时，土壤水稳性团聚体随着生物炭比例的增加而提高，说明生物炭和猪粪协同作用有利于水稳定性团聚体形成；王彤等[24]研究发现生物炭与常规有机肥及厨余发酵物存在显著的相互作用，配合施用时，更有利于形成大团聚体；侯晓娜等[25]研究发现单施生物炭对土壤水稳性大团聚体含量和团聚体稳定性的影响不显著，而生物炭与秸秆配施能提高土壤大团聚体含量，增加土壤团聚体的稳定性。而本研究发现有机无机配合生物炭输入有利于增加 >0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量，且随着生物炭输入量的增加，大团聚体含量显著增加，以上结论和前人研究结果基本一致，主要原因是生物炭与有机肥在土壤中相互作用，提高了土壤有机碳含量，有机碳是一种重要的胶结物质，能够促进土壤团聚体形成。但其中 >2 mm 粒径水稳性团聚体含量不同处理间表现出先升高后降低的趋势，高量生物炭投入条件下，促进了 1 ~ 2 mm 粒径水稳性团聚体含量显著增加，此处化肥、有机肥和生物炭的相互作用机理有待于深入分析研究。同时金梁等[26]研究提出生物炭与化肥配施条件下，黑龙江黑土团聚体随着施炭量增加（超过 31.5 t/hm^2），凝聚性降低，大团聚体数量减少，造成土壤结构稳定性相对降低。而本研究在有机无机配施基础上，随着生物炭施用量的增加，>0.25 mm 粒径水稳性大团聚体含量表现出显著增加的趋势，这主要是本试验基于产投考虑前提下，生物炭的输入梯度范围设计偏小，高施炭量仍没表现出降低大团聚体数量的情况。

生物炭的施入也可增加土壤渗滤能力，大量试验研究结果表明：施入生物炭可有效地提高土壤含水量，减少水分蒸发，尤其在砂质土壤上应用效果最为明显[27-29]。本试验研究结果与前人基本一致，砾石土输入生物炭具有保蓄土壤水分、提高土壤贮水量、调节葡萄水分供给的作用，且生物炭施用量和土壤贮水量成正比。

3.2　生物炭配施对土壤理化性质及作物产量品质的影响

砾石土漏水漏肥导致养分利用效率低下一直是限制宁夏酿酒葡萄产业发展的“瓶颈”问题之一。周桂玉等[30]研究发现添加生物质炭可以明显提高吉林草甸中性黑土土壤中有效磷的含量，但对氮和钾的作用差异不显著，而本研究碱性土壤条件下，施用生物炭对土壤碱解氮和速效钾的促进作用明显，而对有效磷的作用不明显，和研究区高 pH 易导致磷素固定直接相关。高德才等[31]在旱地土壤上施用生物炭量 2% 以上能显著减少氮素淋洗、提高氮素利用率；尚杰等[32]发现生物质炭施用显著提高了土壤全氮和碱解氮含量，与生物炭提供固氮菌发挥效果所需要的丰富氮源直接相关[33]；生物炭中钾的有效性较高，施入土壤能提高土壤速效钾含量[34]，和本研究结构相一致。曾爱等[35]研究发现不同生物炭施用量对土壤 pH 值的影响不显著，和土壤具有一定的酸碱缓冲能力以及试验处理施入的生物炭量不高直接相关；土壤有机碳含量随着生物炭施用量的增加而显著增加。本研究发现，随着生物炭施用量的增加，土壤 pH 值有增加的趋势，但不同生物炭添加量处理之间差异不显著，和上面结果较为一致，同时土壤有机质含量随着生物炭施用量的增加有增加的趋势，但不同施炭量之间差异不显著，和砾石土水分条件不足限制有机物分解转化有直接关系。

生物炭施用对作物叶片净光合速率以及水分有效利用率提升起到积极促进作用，这与张伟明等[36]在水稻上、宋久洋等[37]在烟草上研究结果一致。此外，大量研究表明：施用生物炭可显著提高作物产量[38]，钱嘉文等[39]研究认为生物炭对青菜具有明显增产效应；勾芒芒等[40]也发现生物炭对番茄根系形态特征的优化与产量的提高具有一定的促进作用；本试验结果也证明了生物炭配施增产这一结论。

品质是酿酒葡萄的灵魂，Schmidt 等[41]通过两年田间试验发现施用生物炭在第二年对糖、酸无显著影响，Genesio 等[42]研究认为生物炭对可溶性固形物、还原糖含量影响不显著，而本试验研究发现在施用有机肥的基础上配施生物炭显著提高可溶性固形物、还原糖含量，降低可滴定酸含量，促进酚类化合物以及色素形成，这与前人研究结果不一致，可能是在养分平衡供应的基础上，有机肥和生物炭组合作用，通过生物炭保蓄水分，提高土壤温度创造了有机肥加速分解的条件，产生了多种生物活性物质，促进了作物生长和品质形成。

4　结论

有机无机配施基础上，生物炭输入具有明显提

高土壤水稳性大团聚体含量，降低土壤水稳性小团聚体含量，改善土壤结构的作用，且随着生物炭施用量的增加，>0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量越高，土壤结构稳定性越好。

有机无机与生物炭配施后，土壤水分、养分保蓄效应最佳，其中生物炭施用 6000 kg/hm^2 以上可显著提高土壤 0 ~ 80 cm 土体贮水量超过 30%；显著提高土壤有机质、碱解氮和速效钾含量，且土壤肥力、水分含量也显著提升。

有机无机与生物炭配施后，通过调节土壤水肥供应，显著促进了酿酒葡萄叶片光合作用，优化了果穗长，进而提高了葡萄产量，改善了葡萄品质，基于理论产量模拟最佳生物炭输入量为 7260 kg/hm^2。

参考文献：

[1] 陈卫平，尚红莺，周军，等. 贺兰山东麓酿酒葡萄的生态适应性[J]. 西北植物学报，2007，27（9）：1855–1860.

[2] 陈卫平，王劲松，尚红莺，等. 贺兰山东麓酿酒葡萄土壤资源特征及土壤管理对策[J]. 中外葡萄与葡萄酒，2005（5）：22–24.

[3] 张晓煜，亢艳莉，袁海燕，等. 酿酒葡萄品质评价及其对气象条件的响应[J]. 生态学报，2007，27（2）：740–745.

[4] 唐洪玉，周琳，陈义安. 酿酒葡萄和葡萄酒成分间的典型性相关分析[J]. 重庆工商大学学报（自然科学版），2014，31（1）：93–97.

[5] 朱家明，张晓芳，王强，等. 葡萄与葡萄酒质量的综合评价[J]. 通化师范学院学报，2013，34（6）：8–12.

[6] 陈温福，张伟明，孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学，2013，46(16)：3324–3333.

[7] 李彬，潘根兴，王维锦，等. 施用生物质炭对葡萄生长及土壤肥力的影响[J]. 土壤通报，2015（5）：1168–1173.

[8] Chan K Y，Van Z L，Meszaros I，et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. Australian Journal of Soil Research，2008，46（5）：437–444.

[9] Pulleman M M，Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long–term pasture and arable soil[J]. Geoderma，2004，120（3）：273–282.

[10] 陈心想，何绪生，耿增超，等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报，2013，33（20）：6534–6542.

[11] 颜永毫，王丹丹，郑纪勇. 生物炭对土壤 N_2O 和 CH_4 排放影响的研究进展[J]. 中国农学通报，2013，29（8）：140–146.

[12] 张忠河，林振衡，付娅琦，等. 生物炭在农业上的应用[J]. 安徽农业科学，2010，38（22）：11880–11882.

[13] Glaser B，Lehmann J，Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal–a review[J]. Biology and Fertility of Soils，2002，35（4）：219–230.

[14] 袁晶晶，同延安，卢绍辉，等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2017，23（2）：468–475.

[15] 王玫，徐少卓，刘宇松，等. 生物炭配施有机肥可改善土壤环境并减轻苹果连作障碍[J]. 植物营养与肥料学报，2018，24（1）：220–227.

[16] 孙权，何振立，纪立东. 侵蚀退化生态系统恢复的土壤质量指标[J]. 宁夏大学学报（农业科学版），2004（2）：15–20.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析（第 3 版）[M]. 北京：中国农业出版社，2007.

[18] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京：高等教育出版社，2006.

[19] 王华. 葡萄与葡萄酒实验技术操作规范[M]. 西安：西安地图出版社，1999.

[20] 牛雪，张军翔，徐国前. 葡萄与葡萄酒中总酚测定方法的研究进展[J]. 食品与机械，2016（3）：239–242.

[21] 杨夫臣，吴江，程建徽，等. 葡萄果皮花色素的提取及其理化性质[J]. 果树学报，2007，24（3）：287–292.

[22] 林洪羽，周明华，张博文，等. 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报（中英文），2020，28（1）：96–103.

[23] 李鑫，李永梅，王自林，等. 秸秆生物炭与猪粪配施对山原红壤团聚体结构的影响[J]. 云南农业大学学报（自然科学版），2018，33（4）：737–743.

[24] 王彤，雍继芳，林启美，等. 生物质炭与有机肥料配施可以促进设施菜地土壤水稳性团聚体形成[J]. 华北农学报，2019，34（增刊）：176–182.

[25] 侯晓娜，李慧，朱刘兵，等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学，2015，48（4）：705–712.

[26] 金梁，魏丹，李玉梅，等. 生物炭与化肥配施对土壤主要物理特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报，2017，48（4）：424–430.

[27] 孙爱华，华信，朱士江. 生物炭对土壤养分及水分的影响[J]. 安徽农业科学，2015（8）：64–66.

[28] 许健，牛文全，张明智，等. 生物炭对土壤水分蒸发的影响[J]. 应用生态学报，2016，27（11）：3505–3513.

[29] 肖茜，张洪培，沈玉芳，等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报，2015，31（16）：128–134.

[30] 周桂玉，窦森，刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报，2011，30（10）：2075–2080.

[31] 高德才，张蕾，刘强，等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报，2014，30（6）：54–61.

[32] 尚杰，耿增超，陈心想，等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报，2015，34（3）：509–517.

[33] Thies J E，Rillig M C. Characteristics of biochar：Biological

properties［M］//Lehmanm J，Joseph S M. Biochar for Environmental Management：Science and Technology. Abingdon Uk：Routledge，2012.

［34］ Lehmann J，da Silva J P，Steiner C，et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin：fertilizer，manure and charcoal amendments［J］. Plant and Soils，2003，249：343–357.

［35］ 曾爱，廖允成，张俊丽，等. 生物炭对垆土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响［J］. 农业环境科学学报，2013，32（5）：1009–1015.

［36］ 张伟明，张庆忠，陈温福. 镉污染土壤中施用秸秆炭对水稻生长发育的影响［J］. 北方水稻，2009，39（2）：4–7.

［37］ 宋久洋，刘领，陈明灿，等. 生物质炭施用对烤烟生长及光合特性的影响［J］. 河南科技大学学报（自然科学版），2014（4）：68–72.

［38］ 房彬，李心清，赵斌，等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响［J］. 生态环境学报，2014（8）：1292–1297.

［39］ 钱嘉文，宿贤超，徐丹，等. 生物炭对土壤理化性质及作物生长的影响［J］. 现代农业，2014（1）：15–16.

［40］ 勾芒芒，屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响［J］. 生态环境学报，2013（8）：1348–1352.

［41］ Schmidt H P，Kammann C，Niggli C，et al. Biochar and biochar–compost as soil amendments to a vineyard soil：Influences on plant growth，nutrient uptake，plant health and grape quality［J］. Agriculture Ecosystems & Environment，2014，191：117–123.

［42］ Genesio L，Miglietta F，Baronti S，et al. Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality：Results from a four years field experiment in Tuscany［J］. Agriculture Ecosystems & Environment，2015，201：20–25.

Effects of biochar input on the yield and quality of wine grape and the preservation of water and fertilizer on gravel soil

JI Li-dong，SI Hai-li，LI Lei，YANG Yang（Institute of Agricultural Resources and Environment，Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences，Yinchuan Ningxia 750002）

Abstract：In order to investigate the effects of biochar input on water and nutrient retention in gravel soil and the yield and quality of wine grape under the condition of organic and inorganic application，a 2-year site-specific experiment was conducted at the eastern foot of Helan mountain，and the physical and chemical properties of soil and biological responses of crops under different biochar input conditions were analyzed. The results showed that under organic and inorganic application conditions，with the increase of biochar application amount，the content of water-stable aggregates of >0.25 mm particle size increased significantly，but the content of water-stable aggregates of <0.25 mm particle size decreased significantly，and the soil structure improved significantly. The application of biochar over 6000 kg/hm^2 significantly increased the water storage of 0 ~ 80 cm soil by more than 30%，and significantly increased the content of soil organic matter，available nitrogen and available potassium. It significantly promoted leaf photosynthesis of wine grape，optimized ear length，thus increased grape yield and improved grape quality. The optimal biochar input in the theoretical yield simulation was 7260 kg/hm^2. Therefore，the application of biochar 7260 kg/hm^2 in the gravel soil wine vineyard at the eastern foot of Helan mountain，under the conditions of organic and inorganic application，can quickly construct the soil，protect soil water and nutrients，and is conducive to promoting the healthy and sustainable development of wine grape industry.

Key words：wine grapes；gravel soil；biochar；water-stable aggregates；water storage；production