

DOI: 10.11766/trxb201509280423

不同改良剂对退化黄壤及其下渗水养分的影响*

黄容 高明[†] 汪文强 刘彬彬 刘江

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要 以添加了改良剂的退化黄壤为研究对象, 通过种植莴笋—空心菜—莴笋的盆栽试验, 对比分析添加生物质灰渣改良剂与其他改良剂对蔬菜产量、土壤养分的影响, 并进一步研究了不同改良剂处理下, 退化土壤下渗水养分状况, 以期综合评价改良剂的修复效果提供科学依据。结果表明: (1) NPKH (氮磷钾化肥配施灰渣) 和 NPKW (氮磷钾化肥配施生物肥) 处理的莴笋产量增幅最大; (2) 经改良剂处理的退化土壤有机质的含量和 pH 提高, 随种植时间增加, 土壤有机质含量均下降, 但 NPKH 处理的下降幅度最小, 其次为 NPKC (氮磷钾化肥配施草炭) 处理; 各改良剂处理对碱解氮的影响差异并不明显, NPKH 处理较其他处理能显著提高土壤有效磷 (P)、速效钾 (K) 含量, 其中有效 P 较 NPK (单施化肥) 处理提高了 190.0%~242.9%; (3) 单施化肥在退化土壤上易造成氮素的流失 (总氮 (TN) 流失浓度 22.08~39.06 mg L⁻¹), NPKH、NPKW 和 NPKC 处理的下渗水 TN 浓度均低于其他处理; NO₃-N 是土壤氮素损失的主要形式, 其变化趋势与 TN 较一致, 呈极显著的相关关系 ($p < 0.01$, $r = 0.869$); 在整个盆栽过程中, 土壤下渗水总磷 (TP)、可溶性磷 (DP) 浓度呈极显著的相关性 ($p < 0.01$, $r = 0.892$), DP 浓度占 TP 的 60% 以上; NPKH 处理中的灰渣含有大量的磷元素, 除供作物生长外, 部分会随水流失, 其下渗水中 TP 和 DP 分别为 0.70~1.35 mg L⁻¹ 和 0.67~1.27 mg L⁻¹, 明显高于其他处理, 易造成水体富营养化。

关键词 改良剂; 退化; 黄壤; 下渗水; 生物质灰渣

中图分类号 S147; S152.7 **文献标识码** A

土壤质量退化能直接影响地球表面系统、土壤的生产力及其稳定性、土地承载力, 最终能从根本上动摇人类生存和发展的物质基础^[1]。土壤有机质下降、养分贫瘠化、酸化等是土壤退化的主要标志^[2-3]。近 20 多年来, 国内外学者围绕着退化土壤开展了大量科学研究, 也提出了修复退化土壤的有效措施^[4-7]。土壤改良剂是现代农业中修复退化土壤的一种有效途径, 但是不同改良剂由于结构与性质、作用机理等不同, 造成其施用效果相差较大。研究表明, 粉煤灰虽能降低土壤容重, 调节三相相比, 但粉煤灰中硼含量高, 含 5%~30% 的有毒元素镉、铅等, 易造成土壤、水体与生物的污染; 绿肥可以有效降低土壤中可提取性铝含量, 调节土

壤酸碱度, 但是长期施用豆科绿肥, 会使土壤中累积过量的磷和氮, 造成水体污染; 丛枝菌根真菌 (AMF) 可有效改善土壤矿质养分, 但其种类繁多, 纯培养技术有待改善^[8]。因此, 寻求能够大面积运用, 成本低, 低碳环保的生态型改良剂, 对农业可持续发展起到了至关重要的作用。

生物质灰渣是农业废弃物燃烧产物, 富含磷、钾等营养元素, 呈碱性, 具有疏松多孔的结构^[9], 不仅能改善土壤理化性质, 还能促进作物的生长, 减少病害的发生, 创造良好的土壤环境^[10-13], 是一种可再生的绿色能源。如何利用生物质灰渣修复重庆地区退化土壤、提高经济和社会效益是值得思考的问题。本文以退化黄壤为研

* 国家科技支撑计划项目 (2012BAD14B18) 资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2012BAD14B18)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

作者简介: 黄容 (1989—), 女, 福建福州人, 博士研究生, 主要从事土壤质量与环境研究。E-mail: 277840241@qq.com

收稿日期: 2015-09-28; 收到修改稿日期: 2015-10-18

研究对象,通过在退化黄壤中添加不同改良剂,对比分析了添加生物质灰渣改良剂与其他改良剂对蔬菜产量及土壤养分的影响;目前水体污染的重要污染源——农业面源对水体富营养化的贡献已超过了城市和工业点源污染,退化土壤土层较薄,涵养水分和养分能力较差,易造成营养元素流失,因此本研究中,还进一步研究了不同改良剂处理下,退化土壤下渗水养分状况,研究结果可对综合评价改良剂的修复效果以及农业面源污染的水体富营养化防治提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为黄壤,采集地位于重庆市武隆县仙女山(东经 $107^{\circ}13'$ ~ $108^{\circ}05'$,北纬 $29^{\circ}02'$ ~ $29^{\circ}40'$),均采集0~20 cm表层土壤。采集样品在室温下自然风干,研磨、过筛(2 mm, 1 mm, 0.25 mm),并测其基本理化性质,黄壤呈强酸性(pH 4.8),土壤肥力不高(全氮 1.72 g kg^{-1} ,全磷 1.49 g kg^{-1} ,全钾 20.71 g kg^{-1})。

供试改良剂为熟石灰、沸石、生物质灰渣、生物质肥和草炭。熟石灰为氢氧化钙85%~90%,含水量 $\leq 0.20\%$,白度 $\geq 90\%$,细度(过0.05 mm筛)98%。沸石为乳白色无定型颗粒状(0.45~0.85 mm),颗粒度 $\geq 70.0\%$,可溶性盐类 $\leq 1.5\%$,钙离子交换能力 $\geq 15.0\text{ mg g}^{-1}$ 。生物质灰渣为锯木灰(pH 12.8,含N 0.78 g kg^{-1} , P_2O_5 5.99 g kg^{-1} , K_2O 24.89 g kg^{-1}),于2013年4月在重庆生息节能公司采集,通过从工厂以及农户收集的锯木生物质经粉碎并筛分后,放入锅炉中在800~900 °C下焚烧,所产生的副产品即本试验所需的生物质灰渣。生物有机肥(简称生物肥,由善耕原生物科技发展有限公司提供),含N 24.4 g kg^{-1} , P_2O_5 37.4 g kg^{-1} , K_2O 36.1 g kg^{-1} ,有机碳 118.5 g kg^{-1} 。草炭为东北泥炭土,含N 14.58 g kg^{-1} , P_2O_5 3.12 g kg^{-1} , K_2O 2.42 g kg^{-1} ,腐殖酸 274 g kg^{-1} 。

供试植物为尖叶莴笋和竹叶空心菜。供试肥料氮肥为含N 46%的市售商品尿素,磷肥为含 P_2O_5 12%的过磷酸钙,钾肥为含 K_2O 60%的市售商品氯化钾。

1.2 试验设计

采用盆栽试验进行本研究。于2014年4月开

始,4—5月种植莴笋,6—8月种植空心菜,9—10月种植莴笋。试验用白瓷盆钵分上下两部分,上部分高22 cm、直径20 cm,用于装土种植植株,下部分高10 cm、直径20 cm,用于承接从上部分渗漏下来的水(如图1)。每盆装风干土(过2 mm筛)4 kg。试验设7个处理,连续种植三季植物,在每季作物收获后,每个处理随机取三个进行土样及植株样分析,每个处理重复9次,共63盆:(1)CK(无肥),不施任何肥和改良剂;(2)单施化肥(NPK);(3)化肥与 2 g kg^{-1} 熟石灰配合施用(NPKS);(4)化肥与 2 g kg^{-1} 沸石配合施用(NPKSF);(5)化肥与 50 g kg^{-1} 灰渣配合施用(NPKH);(6)化肥与 2 g kg^{-1} 生物质肥配合施用(NPKW);(7)化肥与 2 g kg^{-1} 草炭配合施用(NPKC)。各改良剂(施用量参照文献[14-15])在装盆时一次性施入,与土样一起充分混匀。每个处理中除CK外所施入肥料的氮磷钾含量均保持一致。试验施肥标准:莴笋氮肥按N 0.15 g kg^{-1} 土,磷肥按 P_2O_5 0.075 g kg^{-1} 土,钾肥按 K_2O 0.075 g kg^{-1} 土施入;空心菜氮肥按N 0.10 g kg^{-1} 土,磷肥按 P_2O_5 0.04 g kg^{-1} 土,钾肥按 K_2O 0.08 g kg^{-1} 土施入。

移栽二叶一心的莴笋苗2株于盆钵中,在莴笋移栽第10天,除CK外,施入全部磷肥和钾肥,氮肥施入总量的40%,施肥后的第7天追施剩余的60%氮肥。莴笋生长过程中,按田间持水量60%定时定量浇水,防治病虫害,在莴笋生长45 d后收获,测定莴笋的产量和土壤养分含量。

在莴笋收获后,移栽形态和长势基本一致的空心菜苗5株于盆钵中,在空心菜移栽第10天,除CK处理外,施入全部氮磷钾肥。空心菜生长过程中,及时浇水,防治病虫害,在空心菜生长30 d后收获第一茬,测定空心菜的产量;在第一茬收获7 d后,除CK外施入全部氮磷钾肥,按田间持水量75%定时定量浇水,按常规作物栽培管理方式管理,于成熟期收获第二茬,测定空心菜产量和土壤养分含量。

空心菜收获后,待盆钵中的水分沥干后,同样移栽的莴笋苗2株于盆钵中,第二季莴笋的种植、施肥、管理以及指标测定等同上述第一季。

下渗水的收集与测定:从2014年4月开始收集盆栽的下渗水,收集原则在每次植株施肥前和收获后收集水样,装入500 ml塑料瓶中带回实验室立

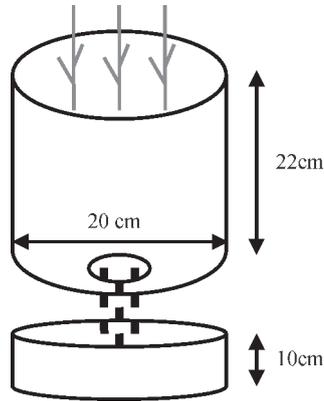


图1 盆栽试验装置

Fig 1 Pot experiment apparatus

即测定相关指标。从2014年4—10月共采集了8次水样，分别为4月23日、5月28日、6月18日、7月7日、7月14日、8月7日、9月3日、10月8日。

1.3 分析方法

土壤全氮：采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮—蒸馏滴定测定，所用仪器为上海纤化仪器公司生产的KDN- O_2C 定氮仪；土壤全磷：采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮—钒钼黄比色法测定；土壤全钾：采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮—火焰光度计法测定（FP640型仪器）；土壤碱解氮：碱解扩散法测定；土壤速效钾： NH_4Ac 浸提—火焰光度计法测定；土壤有效磷： $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提—钼蓝比色法测定；土壤有机质：重铬酸钾容量法测定。具体测定详细步骤参见文献 [16-17]。

采集的水样分成两份，一份用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜抽

滤，过滤后的溶液用于测定硝态氮（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、铵态氮（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）和可溶性磷（DP）；另一份不抽滤，用于测定总氮（TN）和总磷（TP）。其中TN采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定；TP和DP采用过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法测定； $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定； $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用纳氏试剂比色法测定。水样的测定详细步骤参见文献 [18]。

以上比色法所用仪器为TU-1901双光束紫外可见光光度计（北京）和721-P可见分光光度计（上海）。

1.4 数据处理

数据处理采用Excel 2003、SPSS 18.0等统计软件，采用LSD法对数据进行方差分析。

2 结果与讨论

2.1 不同改良剂对蔬菜产量的影响

不同改良剂处理对蔬菜产量影响显著。各处理较CK产量均显著增加，其中第一季莴笋产量增加了33.3%~188.9%，第一茬空心菜产量增加了11.1%~136.0%，第二茬空心菜产量每盆增加了6~232 g，第二季莴笋产量每盆增加了80~340 g。化肥配施灰渣（NPKH）和化肥配施生物肥（NPKW）处理的蔬菜产量增幅最大，在收获第二茬空心菜时，每盆的产量分别较CK增加了231 g和98 g（表1）。灰渣增产原因主要是灰渣除呈强碱性外，还含有大量营养元素平衡了植株的营养吸

表1 不同改良剂处理对蔬菜产量的影响

Table 1 Effects of different amendments on vegetable production (g pot^{-1})

处理 Treatment	莴笋Lettuce		空心菜Spinach	
	第一季 The first crop	第二季 The second crop	第一茬 The first crop	第二茬 The second crop
CK	180 ± 19d	140 ± 10c	1 ± 0.2d	3 ± 1.2e
NPK	320 ± 23b	240 ± 22b	22 ± 3bc	20 ± 3d
NPKS	340 ± 40b	260 ± 19b	19 ± 2c	32 ± 4cd
NPKSF	240 ± 19c	260 ± 27b	26 ± 3b	9 ± 0.6e
NPKH	520 ± 49a	480 ± 35a	137 ± 10a	101 ± 14b
NPKW	240 ± 20c	220 ± 15bc	38 ± 3b	234 ± 20a
NPKC	380 ± 15b	300 ± 19b	13 ± 2c	43 ± 6c

注：不同字母表示同一季度下各处理间在5%水平差异显著 Note: Different letters in the same crop season mean significant difference at 5% level differences between the groups

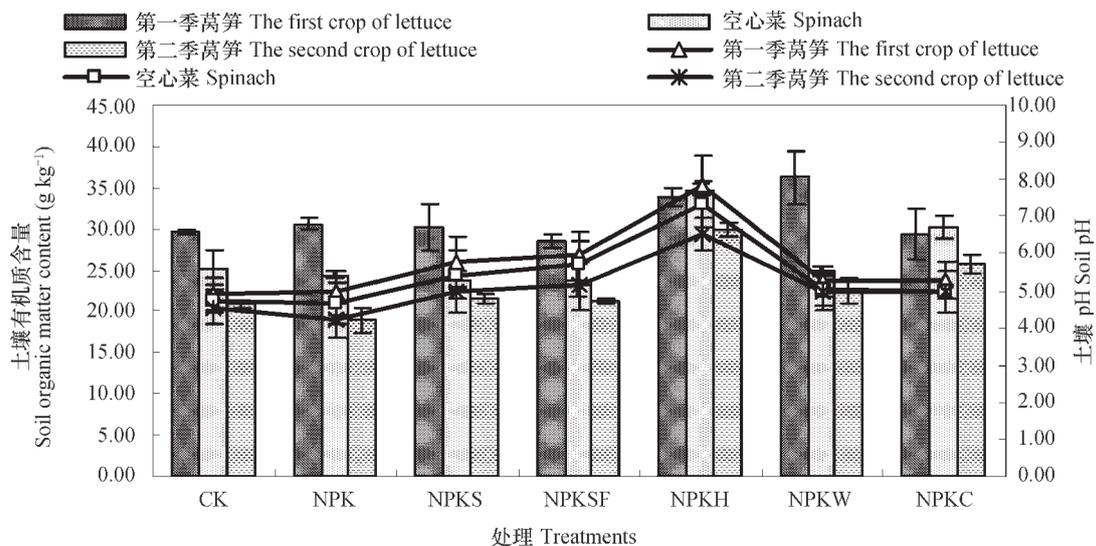
收, 促进其生长。生物肥增产的原因很可能与其富含的腐殖酸有关, 大大提高了土壤中多种营养元素的有效性; 腐殖酸结构中多元酚的存在能加强作物呼吸作用, 增强植株体内的氧化酶活性, 使作物生长加快, 产量提高^[19]。从表1可以看出, 经过莴笋—空心菜—莴笋轮作之后, NPKH处理对作物的增产效果仍高于其他处理, 可见NPK配施灰渣处理较其他处理能更加长效地促进作物增产。

2.2 不同改良剂对退化土壤有机质和pH的影响

土壤有机质含量的高低可以作为退化土壤修复效果的指标之一。从图2可以看出, 在第一季莴笋收获后, 各处理的土壤有机质含量表现为NPKW > NPKH > NPK > NPKS > CK > NPKC > NPKSF, 与对照CK相比, NPKW处理的土壤有机质增幅最大, 提高了22.53%, 其次为NPKH处理提高了14.11%, 这是因为生物肥可以提高土壤有机质中活性有机质的含量, 从而提高了土壤有机质数量^[20]; 空心菜收获后, 除NPKH和NPKC处理有机质含量较前一季增加了0.98 g kg⁻¹, 0.68 g kg⁻¹外, 其余处理的有机质含量均下降, 对当季有机质含量而言, 各处理的土壤有机质含量表现为NPKH > NPKHC > CK > NPKW > NPK > NPKS > NPKSF,

除NPKH和NPKHC处理有机质含量较对照CK升高37.56%和18.94%外, 其余均不同程度地下降。可见在含水量高的土壤环境下, 灰渣配施NPK和草炭配施NPK更有助于土壤有机质的提高, 而其他改良剂效果不明显。经轮作, 第二季莴笋收获后, 各处理的有机质含量表现为NPKH > NPKC > NPKW > NPKS > NPKSF > CK > NPK, 其中NPKH处理对土壤有机质的影响最大, 较CK增加了44.09%, 其次为NPKC处理, 增加了23.36%, 其他处理的增加幅度为1.66%~8.43%。

总体上, 莴笋—空心菜—莴笋轮作模式有助于改良剂提高土壤有机质。在空心菜种植期间土壤含水量较高, NPKH和NPKC处理的效果较佳, 灰渣具有孔隙度大, 比表面积大等特点, 表面大量的Si-O-Si键与水作用后, 使颗粒表面产生大量的羟基而显示出亲水性, 这种高的水分渗透性提高了灰渣的持水性能, 使之在调整土壤结构、提高土壤有机质含量方面有重要的作用。另有研究表明^[21]草炭是一种优良的土壤保水、保肥剂, 有丰富的腐殖酸自由基, 能增加土壤养分, 提高土壤有机质和腐殖质含量, 但是由于草炭具有较大的持水性, 只有当草炭含水量达到一定程度时草炭的整体效应才能



注: 柱状图表示土壤有机质含量, 折线图表示土壤pH; 图中处理CK、NPK、NPKSF、NPKH、NPKW和NPKC分别代表不施任何化肥和改良剂处理、单施化肥处理、化肥配施石灰处理、化肥配施石灰和沸石处理、化肥配施生物质灰渣处理、化肥配施生物有机肥处理和化肥配施草炭处理, 下同 Note: Histogram represents soil organic matter content, dash line soil pH; treatment CK, NPK, NPKSF, NPKH, NPKW and NPKC represents the control, chemical fertilizer (NPK) with lime (S), chemical fertilizer (NPK) with lime and zeolite (SF), chemical fertilizer (NPK) with biomass ash (H), chemical fertilizer (NPK) with biological fertilizer (W), and chemical fertilizer (NPK) with plant ash (C) respectively, the same below

图2 不同改良剂对土壤有机质和pH的影响

Fig. 2 Effects of soil amendments on soil organic matter and pH

正常发挥。在同一处理下，经轮作后各处理的有机质含量均下降，但NPKH处理的下降幅度最小，其次为NPKC处理，从而说明了灰渣配施NPK可以有效地提高土壤有机质含量，且作用效果较其他改良剂持续时间长。何电源^[22]在水稻田上连续3年施用石灰后，发现与对照相比石灰处理的土壤有机质含量降低了24.3%；Hati等^[23]的29年“大豆—马铃薯—小麦”长期轮作试验表明，NPK+石灰处理降低了10.9%的土壤有机碳含量，次于NPK+有机肥处理，这与本试验结果相一致。

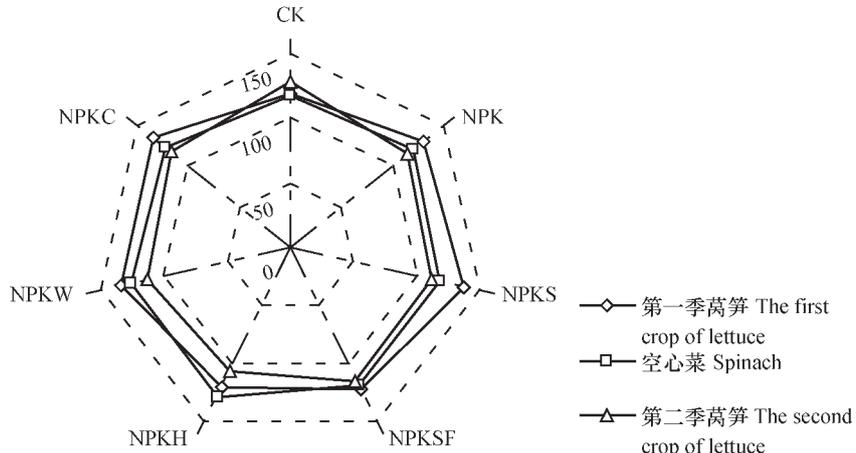
土壤酸化是土壤退化的一个重要方面。土壤酸性增强会导致土壤结构破坏，土壤板结，物理性变差，抗逆能力下降，严重影响作物生长。盆栽试验结果表明（图2），不同改良剂可以有效提高土壤pH，但随着种植时间的增加，pH呈下降趋势。在同一季度下，各处理对土壤pH的影响表现为NPKH > NPKSF > NPKS > NPKW > NPKC > CK > NPK。如图2所示，与原始土样（pH=4.9）相比，CK和NPK处理的pH均下降，NPK处理的土壤pH较对照CK下降了0.08~0.23个单位，可见长时间施用化肥降低了土壤pH。草炭呈弱酸性，因此在改变土壤酸性方面的作用并不显著。NPKW处理在施用生物肥前期，土壤pH较对照提高了0.37个单位，随着种植时间的增加，该处理的pH下降，这与田小明等^[24]和胡诚等^[25]的研究结果相似。对比NPKSF处理和NPKS处理发现，这两个处理均能提高土壤pH，但石灰与沸石混合施用较单施石灰对提高土壤pH的作用显著，这是因为呈碱性的石灰在刚施入土壤后发生酸碱中和反应，使土壤pH上升，但是随着时间的延长，土壤中的石灰被消耗，加上种植期间发生的各种生化反应会产生酸（如尿素进入土壤后产生的 NH_4^+ 会置换出 H^+ ），因而土壤pH又呈下降趋势。而沸石特殊的四面体结构，使其具有离子交换能力^[26]，是吸附土壤中盐基离子的好载体，石灰配施交换性强的沸石后，除了石灰在土壤中发生酸碱中和，提高土壤pH外，沸石中存在大量的交换性 K^+ 、 Na^+ 等易溶性阳离子，可以与土壤中的 H^+ 和 Al^{3+} 离子发生置换，使土壤中交换性酸和水解性酸下降，调节了土壤酸性，从而提高pH，但是随着时间的增加，土壤中的交换性铝仍会缓慢增加，最终使土壤pH又呈下降趋势。灰渣配施NPK对提高土壤pH效果最佳，因为灰渣呈强碱性（pH

12.8）且孔隙度大，含有P、K、Si等矿质营养，可以有效提高土壤pH。

2.3 不同改良剂对退化土壤有效养分影响

有研究表明，土壤改良剂不仅可以调节土壤酸度，还可以提高土壤中有效磷和速效钾含量，降低碱解氮含量^[27-28]。本研究结果表明，在整个盆栽过程中，各处理对土壤碱解氮的影响并不明显，而对土壤有效磷和速效钾有显著影响，特别是NPKH处理的效果远大于其他处理。由图3可知，在第一季莴笋收获后，与对照CK相比，除NPKSF和NPKH处理的土壤碱解氮仅提高 2.03 mg kg^{-1} 和 0.48 mg kg^{-1} ，其他处理增幅均大于 10 mg kg^{-1} ；空心菜收获后，NPKH处理的土壤碱解氮较对照CK增幅最大，为 11.17 mg kg^{-1} ，其次为NPKW和NPKC处理，分别提高了 8.41 mg kg^{-1} 和 6.97 mg kg^{-1} ，其余增幅均在 3 mg kg^{-1} 以下。可见在空心菜种植期间即含水量较高的土壤中，添加灰渣、生物肥和草炭有助于提高土壤碱解氮含量，这是因为灰渣具有较强的吸水性，在含水量较大的土壤中，可以利用自身疏松多孔的结构，提高土壤碱解氮。草炭也具有较大的持水性，只有当草炭的含水量达到一定程度时，才能使草炭保水保肥的性能得到正常发挥，加上草炭和生物肥类似，均含有较多的腐殖酸，能发生化学反应，特别是腐殖酸中的活性含氧官能团——羧基，它不仅能和尿素形成氢键或络合配位键，而且腐殖酸能与 NH_4^+ 发生复杂反应，使土壤在较长时间内保持较高的铵态氮含量。此外，草炭和生物肥提高了土壤中微生物活性，减少了肥料氮素损失，最终提高了土壤碱解氮含量^[29]。第二季莴笋收获后，各处理的碱解氮较NPK处理均有不同程度的下降。

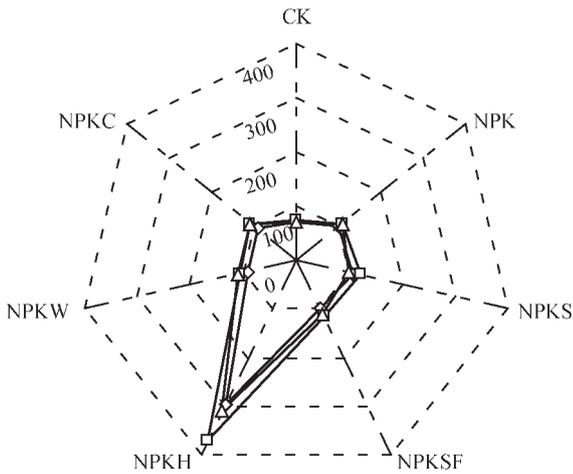
与对照CK相比，各处理均有利于提高土壤有效磷和速效钾含量（图4-图5）。对土壤有效磷而言，在整个盆栽试验过程中，NPKH处理的土壤有效磷含量较对照CK提高了314.6%~397.8%，同时较NPK处理提高了190.0%~242.9%，远大于其他处理，其中在空心菜收获后土壤的有效磷较两次莴笋收获后的含量高，这一方面因为灰渣呈强碱性，施入土壤后活化了难溶性的铁磷和铝磷，甚至有效地降低了闭蓄态磷，减少了磷的固定，提高了土壤中水溶性磷的含量，同时，施入的磷易被疏松多孔的灰渣所吸附，使磷酸的有效性得以保持；另一方面施入的灰渣本身含有大量磷素，施入土壤后可以



土壤碱解氮含量 Content of soil alkalytic N(mg kg⁻¹)

图3 不同改良剂对土壤碱解氮贡献率雷达图

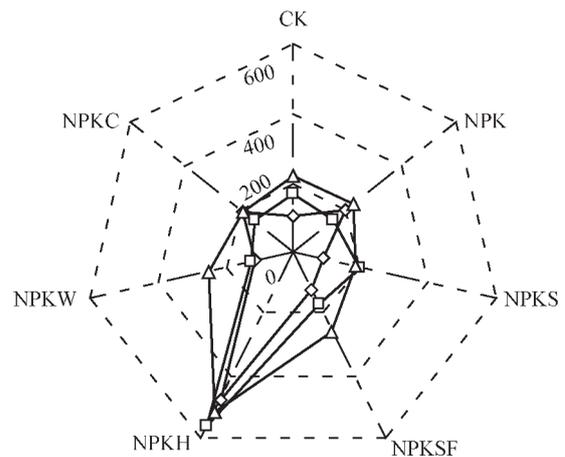
Fig. 3 Radar map of contributions of different amendments to soil alkalytic nitrogen



土壤有效磷含量 Content of soil available P (mg kg⁻¹)

图4 不同改良剂对土壤有效磷贡献率雷达图

Fig. 4 Radar map of contributions of different amendments to soil available phosphorus



土壤速效钾含量 Content of soil available K (mg kg⁻¹)

图5 不同改良剂对土壤速效钾贡献率雷达图

Fig. 5 Radar map of contributions of different amendments to soil available potassium

增加土壤中的磷含量，加上灰渣比表面积大，亲水基团Si-O-Si与水作用后，产生大量的羟基表现出良好的亲水性，提高了灰渣的持水性，故在空心菜收获后，含水量高的土壤中灰渣对磷素保蓄方面有重要作用。黄容等^[11]研究不同生物质灰渣对磷的吸附解吸动力学特征时发现，锯木灰对磷的吸附量和吸附率均较高，吸附量在0.98 ~ 11.21 g kg⁻¹范围内，吸附率均在55%以上，最高可以达到97.72%。如图4所示，除NPKH处理外，其余处理的有效磷含量在92 ~ 130 mg kg⁻¹范围内，大小表现为NPKSF > NPKS > NPKC > NPKW > NPK，

其中NPKSF处理的土壤有效磷含量仅次于NPKH处理，较对照CK增加了20.3% ~ 63.5%，这是因为沸石对磷有良好的吸附和选择交换性^[30]。邵宗亚和赵美芝^[31]研究表明，沸石施入土壤后，能显著改变土壤中不同形态无机磷的组成，提高水溶性磷的含量，增加了磷肥的生物有效性，同时，沸石施入土壤后与土壤中Al和Fe产生交换反应，避免了磷酸被固定，促进土壤中积累态磷的释放，特别是沸石与肥料混合施用后，可以大大提高土壤有效养分^[32]。

从图5可以看出，在整个盆栽过程中，NPKH处理的土壤速效钾含量远大于其他处理，较对照

CK提高了137.5%~356.9%,其他处理的土壤速效钾含量略微下降。在空心菜收获后,除NPKS和NPKH处理的速效钾较CK提高外,其他处理均不同程度地下降,这是因为含水量较大的情况下,草炭、生物肥中的有机质分解受到了抑制。秦玲等^[29]研究指出,草炭对于钾的保肥能力影响并不显著,这与本试验结果相似。沸石在水量充沛时,会将水分固定在其孔隙结构中,不利于钾素的保蓄。但在轮作后,NPKSF和NPKW处理的速效钾含量较对照CK分别提高了15.8%和15.2%,沸石在水分缺少时,会将储存在孔隙中的水分释放出来,增加了土壤通气性,加快土壤的呼吸作用,同时沸石具有独特的空间结构,孔隙通道上存在的大量可交换性离子 K^+ 和 Na^+ 等随水分流出,增加了土壤溶液中的速效钾含量。

2.4 不同改良剂对退化土壤氮磷渗漏淋失的影响

2.4.1 对下渗水TN、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N的影响

目前农业面源污染已经成为水体污染的重要污染源,部分地区农田中氮磷养分流失对水体富营养化的影响程度已经占了首位。图6是不同改良剂处理下,退化土壤下渗水中TN、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N养分状况。由图6可知, NO_3^- -N是土壤氮素损失的主要形式,而 NH_4^+ -N淋失量较低是因为其一部分易被土壤中胶体吸附固定,另一部分通过硝化作用向 NO_3^- -N转变,这与前人研究结果相一致^[33-35]。对照CK未添加任何物质,因此其土壤下渗水中氮素养分含量均是最低的。对土壤下渗水总氮(TN)而言,施肥前土壤下渗水TN浓度明显低于收获前的TN浓度,特别是空心菜收获后,土壤下渗水TN浓度偏高,几乎控制在 33 mg L^{-1} 以上,这是因为空心菜需水量大,随水流失的氮养分含量也较莴笋的高。与NPK处理相比,其他处理的下渗水的TN浓度均降低,可见单施化肥(TN流失浓度 $22.08\sim 39.06\text{ mg L}^{-1}$)在退化土壤上易造成氮素的流失,因为退化土壤土层较薄,在单施化肥的基础上,土壤保肥能力较差,有效养分的自然淋失过程较为强烈,加之供试土壤pH较低,显著抑制了土壤硝化作用,增加了TN淋失。NPKH、NPKW和NPKC处理的下渗水TN浓度均低于其他改良剂处理,这是由于灰渣施入土壤后,提高了土壤的pH,一方面促进了尿素的硝化作用,促进作物吸收,另一方面灰渣吸水能力较强,能提高土壤的保水能力,减少水分流失,最终降低TN淋失;NPKW

和NPKC处理较其他处理含有较多的有机物料,有机物料中丰富的有机质具有保持水分的功能,使水分保持在土壤中而减少了水分下渗,在一定程度上减少了养分随水流失,这与袁京等^[36]研究结果相一致。

如图6所示,各处理的土壤下渗水 NO_3^- -N变化趋势与TN较一致,两者呈极显著的相关关系($p < 0.01$, $r=0.869$),因为尿素施入土壤后,通过硝化作用转化为 NO_3^- -N,又因其带负电,不易被土壤胶体吸附,随水淋溶进入下渗水, NO_3^- -N平均浓度占TN的40%以上,最高可达98.64%,可见土壤中氮素的主要损失形态是 NO_3^- -N。因为 NH_4^+ -N易被土壤胶体吸附固定,在一定条件下通过硝化作用转变为 NO_3^- -N形式^[35],加上 NH_4^+ -N易挥发,采集水样时间相隔较长,故各处理的土壤下渗水中 NH_4^+ -N较低,几乎均控制在 1 mg L^{-1} 以下。5月25日(第一季莴笋收获后)采集的水样中 NH_4^+ -N浓度较高,为 $0.05\sim 5.02\text{ mg L}^{-1}$,其中NPKW处理最高,NPKH处理最低,这可能是因为在盆栽试验初期,土壤pH较其他时期的低(如图2所示),导致微生物的硝化作用减弱, NH_4^+ -N不易向 NO_3^- -N转化,因此该时期下的水样中 NH_4^+ -N偏高^[37],而NPKH处理中的灰渣偏强碱性,较其他处理能更有效地提高土壤pH,有效地降低土壤中 NH_4^+ -N含量,最终减少下渗水中 NH_4^+ -N含量。

2.4.2 对下渗水TP和DP的影响

不同改良剂处理的退化土壤下渗水TP和DP浓度如图7所示,在整个盆栽过程中,土壤下渗水TP和DP浓度变化趋势较一致,两者呈极显著的相关关系($p < 0.01$, $r=0.892$),DP浓度占TP的60%以上。NPKH处理的下渗水TP和DP浓度分别为 $0.70\sim 1.35\text{ mg L}^{-1}$ 和 $0.67\sim 1.27\text{ mg L}^{-1}$,高于其他处理,灰渣属强碱性,富含磷元素,施入土壤后提高了土壤pH,增加了有效磷含量,加上磷活性较差,易被吸附固定,导致土壤具有较大的磷库资源^[13]。有研究表明,土壤有效磷含量较低的情况下,其淋失量也相对较低,而当有效磷超过某一临界值时,磷的流失量则显著增加^[38]。因此NPKH处理下的磷库资源高于其他处理,相应的磷淋失量也高于其他处理,且超过了GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中总磷V类标准限值 0.4 mg L^{-1} 。

从图7还可看出,NPKW处理和NPKSF处理的5月25日(第一季莴笋收获后)采集的水样中磷含量超过 1 mg L^{-1} ,高于其他处理,这是由于NPKW处

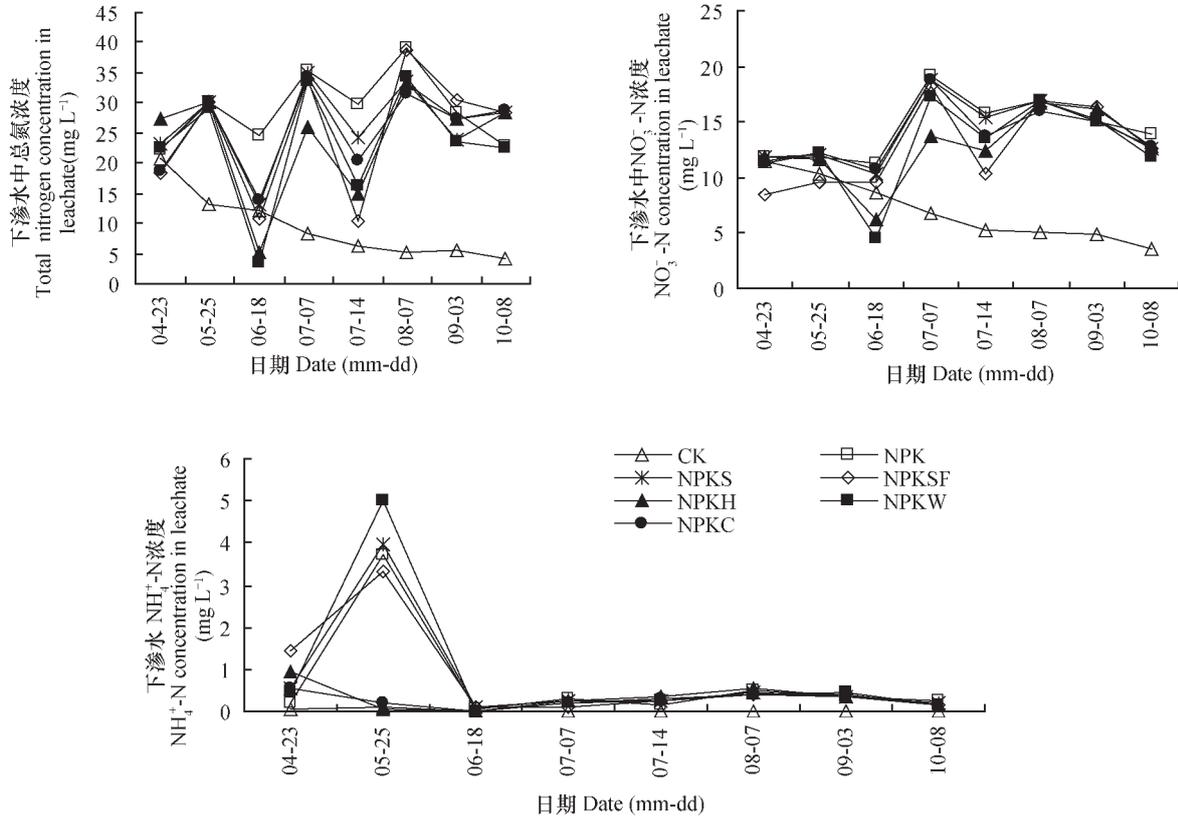


图6 不同改良剂处理退化土壤下渗水总氮、NO₃⁻-N和NH₄⁺-N的含量

Fig. 6 Effects of soil amendments on total nitrogen, NO₃⁻-N and NH₄⁺-N concentrations in soil leachates

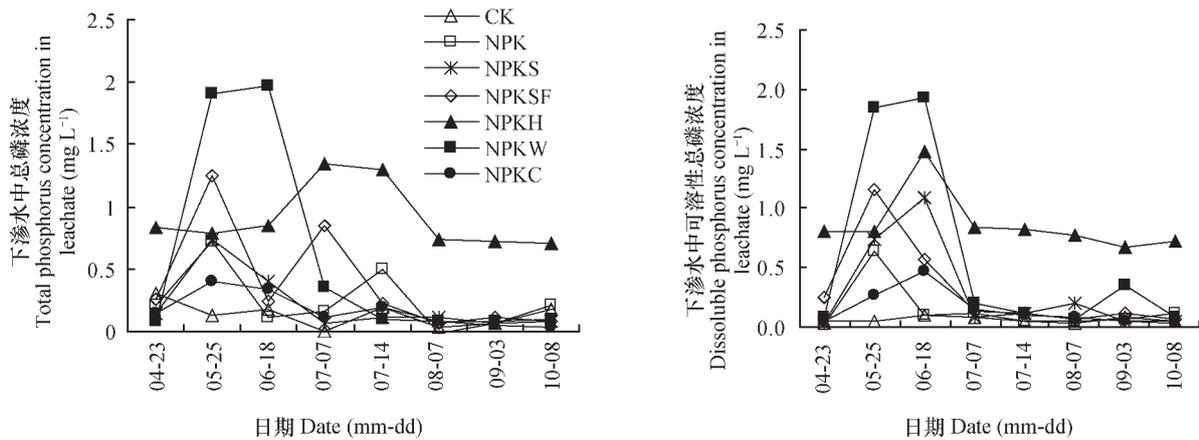


图7 不同改良剂处理退化土壤下渗水总磷和可溶性磷的含量

Fig. 7 Effects of soil amendments on total phosphorus and dissoluble phosphorus content in leachate

理中的生物肥富含有机物料,使磷在土壤中累积,降低土壤对磷的吸附能力,从而增加了土壤渗漏率。在整个盆栽过程中,随着时间的延长,各处理的土壤下渗水的磷浓度呈先增加后减少,最终趋于稳定的趋势。对比两季莴笋的磷渗漏情况发现,第

一季莴笋收获后,各处理下渗水中TP和DP浓度明显高于第二季莴笋收获后的浓度,因为经过轮作之后,土壤 > 0.25 mm 团聚体破碎率增加,土壤中细颗粒含量增加,比表面积增加,促进了土壤对磷素的吸附固定作用,减少了磷淋失量。

3 结 论

不同改良剂均能有效提高蔬菜产量, 其中 NPKH 和 NPKW 处理的蔬菜产量增幅最大。在整个盆栽试验过程中, NPKH 处理较其他改良剂能改善退化土壤的理化性质, 提高土壤 pH, 其次为 NPKW 和 NPKC 处理, 其中 NPKH 处理的土壤有效磷和速效钾较对照 CK 分别提高了 314.6% ~ 397.8% 和 137.5% ~ 356.9%。但是由于生物质灰渣本身含有大量的磷和钾元素, 除供应作物所需的营养元素外, 多余的营养元素会随水流失, 导致其下渗水中营养元素 (下渗水 TP、DP 浓度分别为 0.70 ~ 1.35 mg L⁻¹ 和 0.67 ~ 1.27 mg L⁻¹) 较其他改良剂的高, 易造成水体富营养化。

参 考 文 献

- [1] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策. 生态学报, 2013, 33 (24): 7615—7622
Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (24): 7615—7622
- [2] 史静, 张乃明, 包立. 我国设施农业土壤质量退化特征与调控研究进展. 中国生态农业学报, 2013, 21 (7): 787—794
Shi J, Zhang N M, Bao L. Research progress on soil degradation and regulation of facility agriculture in China (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21 (7): 787—794
- [3] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变. 土壤学报, 2013, 50 (6): 1109—1116
Meng H Q, Liu J, Xu M G, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (6): 1109—1116
- [4] van Zwieten L, Kimber S, Mooris S, et al. Effect of biochar from slow phrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 2010, 327 (1/2): 235—246
- [5] 王秀丽, 梁成华, 马子惠, 等. 施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响. 环境科学, 2015, 36 (4): 1437—1444
Wang X L, Liang C H, Ma Z H, et al. Effects of phosphate and zeolite on the transformation of Cd speciation in soil (In Chinese). *Environmental Science*, 2015, 36 (4): 1437—1444
- [6] 时仁勇, 李九玉, 徐仁扣, 等. 生物质灰对红壤酸度的改良效果. 土壤学报, 2015, 52 (5): 1088—1095
Shi R Y, Li J Y, Xu R K, et al. Effects of bio-ash ameliorating red soil in acidity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5): 1088—1095
- [7] 朱波, 陈实, 游祥, 等. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建. 土壤学报, 2002, 39 (5): 743—749
Zhu B, Chen S, You X, et al. Soil fertility restoration on degraded upland of purple soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (5): 743—749
- [8] 陈义群, 董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展. 生态环境, 2008, 17 (3): 1282—1289
Chen Y Q, Dong Y H. Progress of research and utilization of soil amendments (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2008, 17 (3): 1282—1289
- [9] 李晶, 杨海征, 胡红青, 等. 生物灰渣对小白菜生长的影响及对酸性土壤的改良. 湖北农业科学, 2010, 49 (4): 822—824
Li J, Yang H Z, Hu H Q, et al. Effect of plant fly ash application on Brassica chinensis growth and amendment of acid soil (In Chinese). *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49 (4): 822—824
- [10] 黄容, 高明, 廖燕妮, 等. 生物质灰渣与化肥混合对氨挥发的影响. 土壤学报, 2014, 51 (5): 1160—1167
Huang R, Gao M, Liao Y N, et al. Effects of bio-ash mixed with chemical fertilizer on ammonia volatilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 1160—1167
- [11] 黄容, 高明, 廖燕妮. 不同生物质灰渣对磷的吸附解吸动力学特征. 水土保持学报, 2014, 28 (2): 156—160
Huang R, Gao M, Liao Y N. Phosphorus adsorption and desorption kinetics capacity of different biomass ash (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (2): 156—160
- [12] 陈龙, 王敏, 王硕, 等. 生物质灰渣与化肥配施对土壤性质及油菜生长的影响. 华中农业大学学报, 2011, 30 (6): 727—733
Chen L, Wang M, Wang S, et al. Effects of integrated fertilization with bio-ash and chemical fertilizers on soil properties and growth of rape (In Chinese). *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2011, 30 (6): 727—733
- [13] Aronsson K A, Ekelund N G A. Biological effects of wood ash application to forest and aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33 (5): 1595—1605
- [14] 陈燕霞, 唐晓东, 游媛, 等. 石灰和沸石对酸化菜园土壤改

- 良效应研究. 广西农业科学, 2009, 40 (6): 700—704
- Chen Y X, Tang X D, You Y, et al. Improved effects of lime and zeolite on acidizing vegetable soil (In Chinese). *Guangxi Agricultural Sciences*, 2009, 40 (6): 700—704
- [15] 解开治, 徐培智, 严超, 等. 不同土壤改良剂对南方酸性土壤的改良效果研究. 中国农学通报, 2009, 25 (20): 160—165
- Xie K Z, Xu P Z, Yan C, et al. Study the effects of soil improvement on acid soil in the south of China (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25 (20): 160—165
- [16] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Bao S D. Soil and agro-chemical analysis (In Chinese). 3rd. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [17] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008
- Yang J H. Agricultural soil analysis and environmental monitoring (In Chinese). Beijing: China Land Press, 2008
- [18] 王心芳, 魏复盛, 齐文启, 等. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- Wang X F, Wei F S, Qi W Q, et al. The water and exhausted water monitoring analysis method (In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 2002
- [19] 林军章, 刘森, 杨翔华, 等. 泥炭在农业上的应用. 矿产保护与利用, 2004 (3): 24—29
- Lin J Z, Liu S, Yang X H, et al. Application of peat to agriculture (In Chinese). *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2004 (3): 24—29
- [20] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 不同生物有机肥用量对土壤活性有机质和酶活性的影响. 中国土壤与肥料, 2012 (1): 26—32
- Tian X M, Li J H, Wei C Z, et al. Effect of different bio-organic fertilizer application rate on soil active organic matter and enzyme activities (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012 (1): 26—32
- [21] 位蓓蕾, 胡振琪, 张建勇, 等. 紫花苜蓿对草炭改良露天矿表土替代材料的响应. 农业环境科学学报, 2013, 32 (10): 2020—2026
- Wei B L, Hu Z Q, Zhang J Y, et al. The Response of the peat improved open pit mine topsoil alternative materials for Medicago sativa (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32 (10): 2020—2026
- [22] 何电源. 关于稻田施用石灰的研究. 土壤学报, 1992, 29 (1): 87—92
- He D Y. A review about studies on liming of paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29 (1): 87—92
- [23] Hati K M, Swarup A, Mishra B, et al. Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an alfisol. *Geoderma*, 2008, 148 (2): 173—179
- [24] 田小明, 李俊华, 王成, 等. 连续3年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响. 土壤, 2014, 46 (3): 481—488
- Tian X M, Li J H, Wang C, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three years on soil nutrients, microbial biomass and enzyme activity (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (3): 481—488
- [25] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 等. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15 (3): 48—51
- Hu C, Cao Z P, Luo Y R, et al. Effect of long-term application of micro-organic compost or vermin compost on soil fertility and microbial biomass carbon (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15 (3): 48—51
- [26] 李明遥, 张妍, 杜立宇, 等. 生物炭与沸石混施对土壤Cd形态转化的影响. 水土保持学报, 2014, 28 (3): 248—252
- Li M Y, Zhang Y, Du L Y, et al. Influence of biochar and zeolite on the fraction transform of cadmium in contaminated soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (3): 248—252
- [27] 王秀斌, 唐栓虎, 荣勤雷, 等. 不同措施改良反酸田及水稻产量效果. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (2): 402—412
- Wang X B, Tang S H, Rong Q L, et al. Effects of different ameliorant measures on the chemical and physical properties of soil in acid sulfate paddy field and rice yield (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21 (2): 402—412
- [28] Souza R F, Faquin V, de Andrade A T, et al. Phosphorus forms in soils under influence of liming and organic fertilization. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 2007, 31: 1535—1544
- [29] 秦玲, 康文怀, 李嘉瑞, 等. 草炭及其改良土壤对氮、磷、钾的吸附特性. 中南林业科技大学学报, 2009, 29 (1): 20—24
- Qin L, Kang W H, Li J R, et al. Nitrogen, phosphorus and potassium adsorption characteristics of peat, sandy soil, loamy soil and their mixture (In Chinese). *Journal of Central South Forestry*

- University, 2009, 29 (1): 20—24
- [30] 姜新福, 孙向阳, 关裕宓. 天然沸石在土壤改良和肥料生产中的应用研究进展. 草业科学, 2004, 21 (4): 48—51
Jiang X F, Sun X Y, Guan Y B, et al. Research development in the application of natural zeolite in soil improvement and fertilizer production (In Chinese). Pratacultural Science, 2004, 21 (4): 48—51
- [31] 邵宗亚, 赵美芝. 土壤中积累态磷活化动力学研究 II 沸石的影响. 土壤通报, 2002, 33 (2): 121—123.
Shao Z Y, Zhao M Z. Activation kinetics of accumulative phosphorus in soils II. The effects of zeolite (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33 (2): 121—123
- [32] Allen E R, Hossner L R, Ming D W, et al. Release rates of phosphorus, ammonium, and potassium in clinoptilolite-phosphate rock systems. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60 (5): 1467—1472
- [33] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (2): 326—335
Xi B, Qu L M, Liu S, et al. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21 (2): 326—335
- [34] Fernández-Escobar R, Benlloch M, Herrera E, et al. Effect of traditional and slow-release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching. Scientia Horticulturae, 2004, 101 (1): 39—49
- [35] Yu H, Xi B, Jiang J, et al. Environmental heterogeneity analysis, assessment of trophic state and source identification in Chaohu Lake, China. Environmental Science and Pollution Research International, 2011, 18 (8): 1333—1342
- [36] 袁京, 李国学, 李荣花, 等. 小麦/玉米轮作体系中不同施肥方法下的养分淋溶排污系数测算. 农业环境科学学报, 2015, 34 (4): 738—744
Yuan J, Li G X, Li R H, et al. Calculating discharge coefficients for soil nutrients in wheat-maize rotation system under different fertilization practices (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34 (4): 738—744
- [37] 邢英, 李心清, 王兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟. 生态学杂志, 2011, 30 (11): 2483—2488
Xing Y, Li X Q, Wang B, et al. Effects of biochar on soil nitrogen leaching: A laboratory simulation test with yellow soil column (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2011, 30 (11): 2483—2488
- [38] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响. 环境科学学报, 2015, 35 (4): 1125—1135
Ye Y S, Liang X Q, Li L, et al. Effects of different water and nitrogen managements on phosphorus loss via runoff and leaching from paddy fields in Taihu Lake Basin (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35 (4): 1125—1135

Effects of Different Soil Amendments on Degraded Yellow Soil and Nutrients in Leachate

HUANG Rong GAO Ming[†] WANG Wenqiang LIU Binbin LIU Jiang
(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract Soil degradation caused by irrational land utilization has greatly threatened sustainable development of the world agriculture. In degraded soil aggregates are readily crushable or breakable and the increasing amount of small-sized aggregates affects stability of the soil structure. In recent years, soil erosion led by soil degradation affects the lives of thousands of millions of people around the world. Biomass ash, a combustion product of agricultural wastes, is low in pH, porous in structure and rich in phosphorus, potassium and other nutrients. Its use as soil amendment can not only improve soil physical and chemical properties and yield of crops but also reduce incidence of crop diseases. Therefore, biomass ash is a new type of green and potentially valuable material that can be used to improve soil quality. In this study, saw-dust ash prepared in an incinerator at 800 ~ 900 °C was selected as biomass ash (H). Besides this, other soil amendments including lime (S), lime with zeolite

(SF), biological fertilizer (W), plant ash (C), were used, separately, in addition to chemical fertilizer (NPK) in a pot experiment using degraded yellow soil from the Wulong Fairy Hill area in Chongqing for comparison. A lettuce-spinach-lettuce rotation system was adopted to determine effects of the soil amendments on yield and quality of the vegetable and soil fertility as well as on nutrient contents in soil leachate. The aim of this study is to provide scientific basis for comprehensive evaluation of effects of the soil amendments ameliorating degraded yellow soil. Results showed as follows: (1) The effects of the soil amendments varied significantly from one another. Treatments NPKH and NPKW were higher than all the others in lettuce yield. The use of soil amendments in addition to chemical fertilizer helped reduce NO_3^- -N content in lettuce as compared with the use of Chemical fertilizer alone, the content of amino acids in lettuce was the highest in Treatment NPKH; (2) The effects on the degraded soil also differed with type of amendment. The use of soil amendments increased soil organic matter and pH. The content of soil organic matter decreased with the planting going on, but the decrease was the least in Treatment NPKH, which was followed by Treatment NPKC. The effects of the amendments on alkalytic N did not differ much, but the effect of raising soil available P and available K was the highest in Treatment NPKH, with the effect on soil available P in particular, being 190.0% ~ 242.9% higher than that in Treatment NPK. (3) The use of chemical fertilizer alone in degraded soil may easily lead to N loss, which may amount to 22.08 ~ 39.06 mg L^{-1} in total N (TN). The leachates from Treatments NPKH, NPKW and NPKC were lower than those from the others in TN concentration. NO_3^- -N was the main form of soil nitrogen lost with leachate, and similar in trend and very closely related to TN ($p < 0.01$, $r=0.869$). During the pot experiment, Total phosphorus (TP) and disissoluble phosphorus (DP) concentrations in the leachates displayed significant correlation ($p < 0.01$, $r=0.892$). DP accounted for more than 60% of TP in concentration. In Treatment NPKH, as ash per se contained a large volume of P, besides the portion absorbed by the crops, a portion was lost with leachate. The concentration of TP and DP in the leachate from Treatment NPKH reached 0.70 ~ 1.35 mg L^{-1} and 0.67 ~ 1.27 mg L^{-1} , respectively, significantly higher than those in the leachates from the other treatments², thus posing a risk of eutrophying the nearby waterbody.

Key words Amendment; Degradation; Yellow soil; Water seepage; Biomass ash

(责任编辑: 陈荣府)