

环境材料与肥料配施对土壤水肥及玉米产量的影响

孙朋成,黄占斌*,刘伟华,钟建,刘陆涵
(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083)

摘要:采用盆栽方法,研究了高分子保水材料(SAP,0、0.05、0.10、0.50 g/kg)、吸附性矿物材料(AM,0、5.0、10.0、15.0 g/kg)、煤基营养材料(CBN,0、0.5、1.0、1.5 g/kg)3种环境材料与化肥(CF,0、0.9、1.8、2.6 g/kg)、有机肥(OF,0、6、8、10 g/kg)配施对土壤含水率、速效氮含量、速效磷含量、脲酶活性、碱性磷酸酶活性及玉米产量的影响。结果表明,环境材料与肥料配施可以提高土壤含水率,其中吸附性矿物材料对其影响最大,最佳组合为SAP₂CBN₂AM₄CF₁OF₃;可增加能够被植物直接吸收利用的速效氮含量,其中化肥对其影响最大,最佳组合为SAP₂CBN₂AM₄CF₄OF₃;可增加能够被植物直接吸收利用的速效磷含量,其中有机肥对其影响最大,最佳组合为SAP₁CBN₄AM₄CF₄OF₂;可提高土壤脲酶及碱性磷酸酶活性,其中有机肥对二者影响最大,最佳组合分别为SAP₁CBN₂AM₂CF₁OF₄、SAP₃CBN₂AM₂CF₁OF₄;可增加玉米籽粒产量,其中有机肥对其影响最大,最佳组合为SAP₄CBN₃AM₂CF₃OF₄。综上,环境材料与肥料配施可增加土壤水肥,进而促进玉米增产。

关键词:环境材料;肥料;土壤;水分;肥力;玉米产量
中图分类号: TQ314.1;S156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2015)09-0045-06

Effect of Combined Application of Environmental Materials and Fertilizers on Soil Moisture, Fertility and Maize Yield

SUN Pengcheng, HUANG Zhanbin*, LIU Weihua, ZHONG Jian, LIU Luhan
(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Pot culture experiment was carried out to study the effect of three kinds of environmental materials (water retaining polymer material (SAP, 0, 0.05, 0.10, 0.50 g/kg), absorbent mineral materials (AM, 0, 5.0, 10.0, 15.0 g/kg), coal-based nutrition materials (CBN, 0, 0.5, 1.0, 1.5 g/kg)) and fertilizers (chemical fertilizer (CF, 0, 0.9, 1.8, 2.6 g/kg), organic fertilizer (OF, 0, 6, 8, 10 g/kg)) on soil moisture content, available nitrogen content, available phosphorus content, urease activity, alkaline phosphatase activity and maize yield. The results showed that the combined application of environmental materials and fertilizers could improve soil moisture, and the adsorbent mineral material had the largest influence on soil moisture, the best combination was SAP₂CBN₂AM₄CF₁OF₃; the combined application of environmental materials and fertilizers could increase the available nitrogen content which could be directly absorbed

收稿日期:2015-04-20
基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110023120016);国家科技支撑计划项目(2015BAD0503)
作者简介:孙朋成(1986-),男,河南濮阳人,在读博士研究生,研究方向:环境材料与污染治理。
E-mail: pengcheng2008318@163.com
* 通讯作者:黄占斌(1961-),男,陕西杨凌人,教授,博士,主要从事环境材料与农业面源污染及重金属污染治理研究。
E-mail: zbhuan2003@163.com

and used by plants, and the chemical fertilizer had the largest influence on soil available nitrogen content, the best combination was $SAP_2CBN_2AM_4CF_4OF_3$; the combined application of environmental materials and fertilizers could increase the available phosphorus content which could be directly absorbed and used by plants, and the organic fertilizer had the largest influence on soil available phosphorus content, the best combination was $SAP_1CBN_4AM_4CF_4OF_2$; the combined application of environmental materials and fertilizers could improve soil urease and alkaline phosphatase activities, and the organic fertilizer had the largest influence on both indexes, the best combinations were $SAP_1CBN_2AM_2CF_1OF_4$, $SAP_3CBN_2AM_2CF_1OF_4$ respectively; the combined application of environmental materials and fertilizers could increase maize yield, and the organic fertilizer had the largest influence on maize yield, the best combination was $SAP_4CBN_3AM_2CF_3OF_4$. In summary, the combined application of environmental materials and fertilizers could increase soil moisture and fertility, thus increasing maize yield.

Key words: environmental material; fertilizer; soil; moisture; fertility; maize yield

农田干旱缺水、水肥利用效率低和农业面源污染是限制我国农业可持续发展的 3 个重要方面^[1-2]。我国农业年用水约 $4.0 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 占总用水量的 71% 左右, 其中 90% 用于农田灌溉^[3]。但水资源本身不足及水资源浪费严重、水资源遭受严重污染使我国水资源短缺的状况更加严峻^[4]。我国农田单位面积化肥用量为世界平均水平的 2 倍, 氮、磷肥利用率仅为 30% ~ 35%、10% ~ 25%, 氮、磷流失和由此造成的农业面源污染非常严重^[5-6]。每年因氮肥、磷肥流失引起的直接损失为 300 亿 ~ 500 亿元^[5]。为破解农业发展困局, 迫切需要一种农田土壤环境改良材料或技术, 在设定条件下对土壤水肥气热状况进行调节, 促进水肥高效利用。

环境材料是具有最大使用性能与最低环境负荷的一类生态材料^[7], 近年在农业生产和环境治理中的应用受到重视。杨永辉等^[8]施用保水剂提高了土壤剖面各层次的含水率及冬小麦干物质积累量、产量和水分利用效率。盖霞普等^[9]证实施用玉米秆基生物碳可以减少土壤水分流失 10% ~ 26%, 减少无机氮流失 27% ~ 61%。李嘉竹等^[10]报道, 不同环境功能材料混施能很好地发挥各种材料的协同作用, 实现土壤水分和肥料的最佳耦合, 可有效提高水、肥利用效率 110%、39% 以上, 增产 47.4%。杨宇等^[11]报道黄腐酸能够降低盐碱土壤 pH 值, 增加土壤稳定性团粒结构和微生物的种类、数量。黄震等^[12]证实, 环境材料能够增加土壤速效养分, 调节土壤脲酶和磷酸酶活性。然而, 将环境材料与肥料配施促进土壤水肥高效利用及农作物增产增收的报道较少^[8]。为此, 本研究针对农田土壤干旱缺水、水肥利用效率低和农田面源污染问题, 采用盆栽试验研究环境材料与肥料配施对土壤水肥利用及玉米产量的影响, 为农业可持续发展和农民增产增收提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试土壤取自北京市通州区农田表层 (0 ~ 20 cm) 土壤。土壤机械组成为黏粒 17.48%、粉粒 58.93%、砂粒 23.59%; 土壤理化性状为碱解氮 15.75 mg/kg、速效磷 54.40 mg/kg、有机质 10.45 g/kg、阳离子交换量 (CEC) 6.19 cmol/kg、电导率 0.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、含水率 7.63%、孔隙度 50.50%、容重 1.18 N/m^3 、pH 值 8.31。经风干, 碾碎, 剔除杂物后过 5 mm 筛, 于 25 cm \times 25 cm 塑料盆中装入 8 kg 土壤。

供试环境材料有 3 种: 高分子保水材料 (SAP) 是高纯度聚丙烯酸盐 (钾盐) 和聚丙烯酰胺通过多反应官能团的交联剂进行网状化反应而成的阴离子强吸水性聚合物, 由北京金元易公司提供; 吸附性矿物材料 (AM), 其中以斜发沸石为主, 占 90%, 蒙脱石和石英分别占 8% 和 2%, 其粒度为 0.178 mm, 比表面积大于 300, 由河南信阳淮业矿物有限公司提供; 煤基营养材料 (CBN), 其中含黑腐酸 45%、黄腐酸 16.7%、棕腐酸 29.5%。

供试化肥 (CF) 为尿素 ($\text{N} \geq 46\%$) 和过磷酸钙 ($\text{P}_2\text{O}_5 \geq 12\%$), 本研究中, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5 = 1:0.75$ 。有机肥 (OF) 为羊粪, 市场购买。

供试玉米品种为纪元 1 号。

1.2 试验设计

本试验针对 3 种环境材料和 2 种肥料设置 5 因素 4 水平正交试验, 采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表将 3 种环境材料与 2 种肥料进行配施, 处理 1 是本试验的空白对照组 (表 1)。

使用搅拌机将 3 种环境材料与 2 种肥料按照表 1 中的添加量与盆栽土混匀 (2014 年 3 月 10 日), 每

盆加入 2 L 自来水,老化 1 个月,于清明后(2014 年 4 月 10 日)播种,每塑料盆中播种玉米 3 穴,每穴 2 株。自来水浇灌,准确记录每次浇水量。在玉米生长后期(2014 年 8 月 19 日)采集土壤样品测定土壤含水量、速效氮、速效磷含量及土壤脲酶和碱性磷酸酶活性。2014 年 9 月 17 日采集玉米籽粒,并烘干称质量。

表 1 3 种环境材料和 2 种肥料的正交试验设计

处理编号	因素				
	SAP	CBN	AM	CF	OF
1	1(0)	1(0)	1(0)	1(0)	1(0)
2	1(0)	2(0.5)	2(5.0)	2(0.9)	2(6)
3	1(0)	3(1.0)	3(10.0)	3(1.8)	3(8)
4	1(0)	4(1.5)	4(15.0)	4(2.6)	4(10)
5	2(0.05)	1(0)	2(5.0)	3(1.8)	4(10)
6	2(0.05)	2(0.5)	1(0)	4(2.6)	3(8)
7	2(0.05)	3(1.0)	4(15.0)	1(0)	2(6)
8	2(0.05)	4(1.5)	3(10.0)	2(0.9)	1(0)
9	3(0.10)	1(0)	3(10.0)	4(2.6)	2(6)
10	3(0.10)	2(0.5)	4(15.0)	3(1.8)	1(0)
11	3(0.10)	3(1.0)	1(0)	2(0.9)	4(10)
12	3(0.10)	4(1.5)	2(5.0)	1(0)	3(8)
13	4(0.50)	1(0)	4(15.0)	2(0.9)	3(8)
14	4(0.50)	2(0.5)	3(10.0)	1(0)	4(10)
15	4(0.50)	3(1.0)	2(5.0)	4(2.6)	1(0)
16	4(0.50)	4(1.5)	1(0)	3(1.8)	2(6)

注:括号内为因素实际用量(g/kg),括号外为因素水平。

1.3 测定项目及方法

土壤含水量采用环刀法测定^[13],速效氮含量采用碱解扩散法测定^[14],速效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑比色法测定^[15];脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定^[16],碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[17]。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 及 SPSS 17.0 软件进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 环境材料与肥料配施对土壤水肥条件及土壤酶活性的影响

2.1.1 土壤水肥条件 由图 1—3 可知,土壤中添加环境材料和肥料后,土壤速效氮、速效磷含量及含水率均有明显改善。其中,土壤含水率较对照提高 4.1%~139.2%,以处理 13、14、7、8、10 效果较优;速效氮含量较对照提高 14.3%~85.7%,以处理 4、6、2、13 效果较优;速效磷含量较对照增加 1.3%~70.5%,以处理 4、7、9、2 效果较好。

采用极差分析(表 2)发现,土壤含水率极差表

现为 $R_{AM} > R_{SAP} > R_{CBN} > R_{OF} > R_{CF}$,即矿物吸附材料(AM)对土壤含水率影响最大,高分子保水材料(SAP)次之,化肥(CF)对其影响最小,最优组合为 $SAP_2CBN_2AM_4CF_1OF_3$;土壤速效氮极差表现为 $R_{CF} > R_{AM} = R_{OF} > R_{CBN} > R_{SAP}$,即化肥对土壤速效氮含量影响最大,有机质和矿物吸附材料次之,高分子保水材料对土壤速效氮含量影响最小,最优组合为 $SAP_2CBN_2AM_4CF_4OF_3$;土壤速效磷极差表现为 $R_{OF} > R_{CF} > R_{AM} > R_{SAP} > R_{CBN}$,即有机肥对其影响最大,化肥次之,煤基营养材料影响最小,最优组合为 $SAP_1CBN_4AM_4CF_4OF_2$ 。

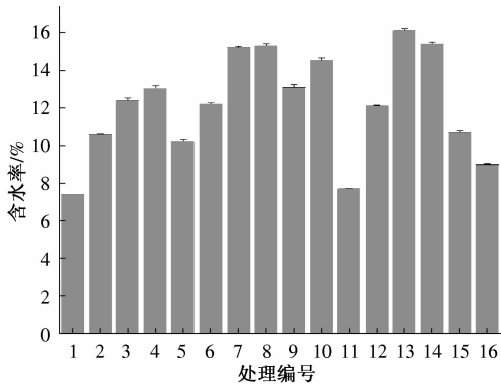


图 1 环境材料与肥料配施对土壤含水率的影响

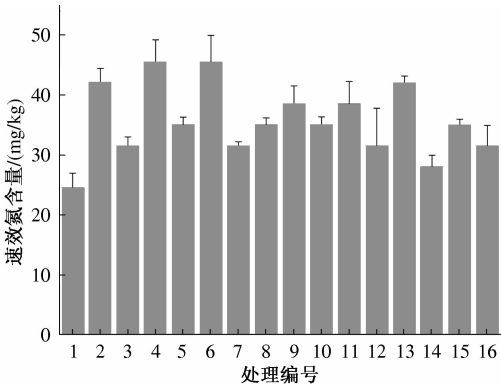


图 2 环境材料与肥料配施对土壤速效氮含量的影响

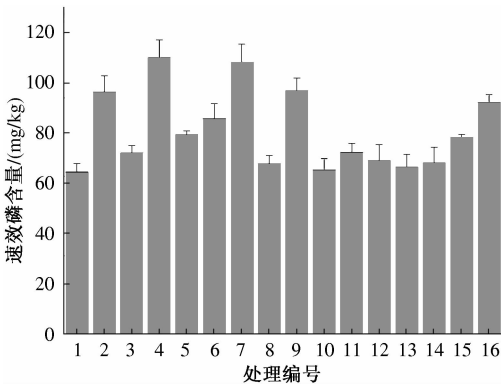


图 3 环境材料与肥料配施对土壤速效磷含量的影响

进一步进行方差分析发现,矿物吸附材料对土

壤含水率影响显著, $F_{AM} = 3.733 > F_{0.1}(3, 12) = 3.509 > F_{0.1}(3, 12) = 2.610$; 有机肥对土壤速效磷 2.610; 化肥对土壤速效氮含量影响显著, $F_{CF} =$ 含量影响显著, $F_{OF} = 2.826 > F_{0.1}(3, 12) = 2.610$ 。

表 2 环境材料与肥料配施对土壤含水率、速效氮、速效磷含量影响的极差分析

指标	项目	SAP	CBN	AM	CF	OF
含水率	k_1	10.850	11.700	9.075	12.525	11.975
	k_2	13.225	13.175	10.900	12.245	11.975
	k_3	11.850	11.500	14.050	11.525	13.200
	k_4	12.800	12.350	14.700	12.250	11.575
	R	2.375	1.675	5.625	1.000	1.625
	主次顺序 最优组合	AM > SAP > CBN > OF > CF SAP ₂ CBN ₂ AM ₄ CF ₁ OF ₃				
速效氮含量	k_1	35.875	35.000	35.000	28.875	32.375
	k_2	36.750	37.625	35.875	39.375	35.875
	k_3	35.875	34.125	33.250	33.250	37.625
	k_4	34.125	35.875	38.500	41.125	36.750
	R	2.625	3.500	5.250	12.250	5.250
	主次顺序 最优组合	CF > AM = OF > CBN > SAP SAP ₂ CBN ₂ AM ₄ CF ₄ OF ₃				
速效磷含量	k_1	85.668	76.708	78.635	77.400	68.930
	k_2	85.188	78.817	80.670	75.653	98.313
	k_3	75.830	82.632	76.118	77.175	73.238
	k_4	76.175	84.703	87.438	92.633	82.380
	R	9.838	7.955	11.320	16.980	29.383
	主次顺序 最优组合	OF > CF > AM > SAP > CBN SAP ₁ CBN ₄ AM ₄ CF ₄ OF ₂				

2.1.2 土壤酶活性 土壤酶对土壤肥料的转化和肥效起着关键作用,可以增加土壤养分的有效性,反映土壤的供肥能力。由图 4 可知,除处理 9、15 外,各处理脲酶活性较对照增加 3.6% ~ 141.8%,其中处理 2、4、7 增幅较大,效果较为显著,对于提高土壤中脲酶活性有巨大促进作用。图 5 表明,除处理 16 外,其他各处理土壤碱性磷酸酶活性较对照增加 0.3% ~ 36.9%,其中处理 2、5、9、11、12 碱性磷酸酶活性较对照增加较大。

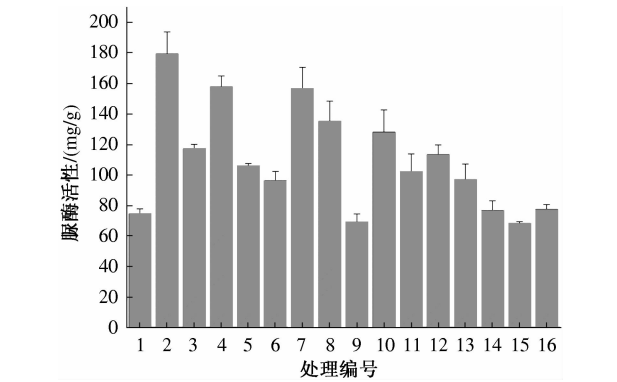


图 4 环境材料与肥料配施对土壤脲酶活性的影响

进一步分析(表 3)发现,脲酶活性极差表现为 $R_{OF} > R_{CF} > R_{AM} > R_{CBN} > R_{SAP}$,即有机肥对脲酶活性的影响最大,化肥次之,高分子保水材料对脲酶活性影响最小,最佳组合为 SAP₁CBN₂AM₂CF₁OF₄。碱性

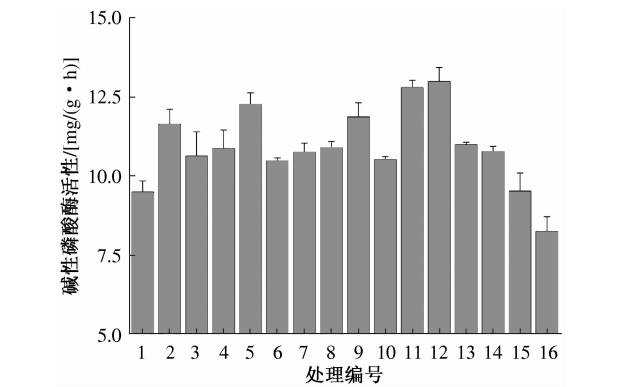


图 5 环境材料与肥料配施对土壤碱性磷酸酶活性的影响

磷酸酶活性极差表现为 $R_{OF} > R_{CF} > R_{AM} > R_{CBN} > R_{SAP}$,即有机肥对碱性磷酸酶活性影响最大,化肥次之,高分子保水材料对碱性磷酸酶活性影响最小,最佳组合为 SAP₃CBN₂AM₂CF₁OF₄。这是因为有机肥中含有大量有机磷,对补充土壤磷素含量和提高碱性磷酸酶活性具有重要作用^[17]。

2.2 环境材料与肥料配施对玉米产量的影响

图 6 表明,添加环境材料及肥料后,各处理玉米籽粒产量较对照有明显增加,提高 18.2% ~ 103.1%,以处理 11、14、16 效果较好。

采用极差分析(表 4)发现,玉米籽粒产量极差表现为 $R_{OF} > R_{CBN} > R_{AM} = R_{SAP} > R_{CF}$,即有机肥对玉米籽粒产量影响最大,煤基营养材料次之,化肥最

小,最佳组合为 $SAP_4CBN_3AM_2CF_3OF_4$ 。进一步方差分析表明,有机肥对玉米籽粒产量影响显著, $F_{OF} = 2.633 > F_{0.1}(3,12) = 2.610$ 。

表 3 环境材料与肥料配施对土壤脲酶及碱性磷酸酶活性影响的极差分析

指标	项目	SAP	CBN	AM	CF	OF
脲酶活性	k_1	167.13	88.89	95.09	473.80	116.48
	k_2	130.93	211.48	461.58	143.43	122.78
	k_3	92.96	103.43	285.65	99.63	332.69
	k_4	44.82	120.93	298.06	70.10	637.04
	R	122.31	122.59	366.48	403.70	520.56
	主次顺序	OF > CF > AM > CBN > SAP				
磷酸酶活性	最优组合	$SAP_1CBN_2AM_2CF_1OF_4$				
	k_1	11.16	11.66	10.76	45.08	10.61
	k_2	11.10	22.52	45.22	11.58	10.63
	k_3	12.05	10.93	34.02	10.42	32.52
	k_4	9.89	10.75	31.42	10.69	74.43
	R	2.16	11.76	34.47	34.67	63.82
	主次顺序	OF > CF > AM > CBN > SAP				
	最优组合	$SAP_3CBN_2AM_2CF_1OF_4$				

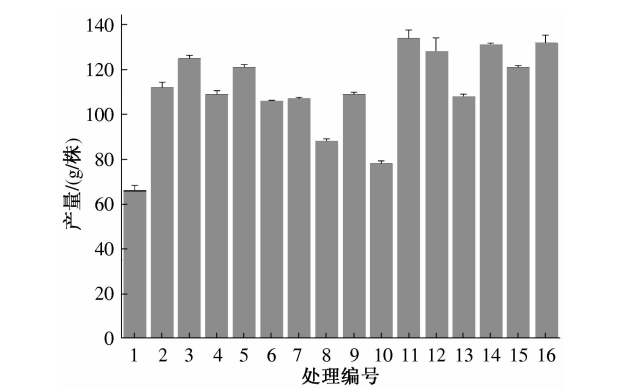


图 6 环境材料与肥料配施对玉米籽粒产量的影响

表 4 环境材料与肥料配施对玉米籽粒产量影响的极差分析

项目	SAP	CBN	AM	CF	OF
k_1	103.000	101.000	109.500	108.000	88.250
k_2	105.500	106.750	120.500	110.500	115.000
k_3	112.250	121.750	113.250	114.000	116.750
k_4	123.000	114.250	100.500	111.250	123.750
R	20.000	20.750	20.000	6.000	35.500
主次顺序	OF > CBN > AM = SAP > CF				
最优组合	$SAP_4CBN_3AM_2CF_3OF_4$				

3 结论与讨论

本研究结果表明,环境材料与肥料配施可以提高土壤含水率,增加作物可利用水含量,在组合为 $SAP_2CBN_2AM_4CF_1OF_3$ 时,作用效果最好。其中矿物吸附材料显著影响土壤含水率,这是因为矿物吸附材料具有较大的比表面积、孔体积,在保持土壤水分、增加土壤可利用水分方面效果显著。另外,高分子保水材料具有羧基、羟基等亲水基团,对增加土壤含水率也有重要作用,与李嘉竹等^[10]研究结果

一致。

环境材料与肥料配施可增加能够被植物直接吸收利用的速效氮、速效磷含量。化肥显著影响土壤速效氮含量,配施组合为 $SAP_2CBN_2AM_4CF_4OF_3$ 时效果最好;有机肥显著影响土壤速效磷含量,配施组合为 $SAP_1CBN_4AM_4CF_4OF_2$ 时,效果最好。施加化肥是增加土壤氮含量最快捷的方式,而有机肥含有大量有机氮,能促进土壤微生物活动和土壤脲酶活性,加快土壤氮素转化,亦可增加土壤可利用氮素供给量^[18]。矿物吸附材料则可对氮肥起到保持与缓释作用^[10]。有机肥中含有大量含磷有机物,其可促进微生物活动,加快有机磷转化,增加土壤磷素有效性,添加有机肥可快速增加土壤可利用磷素含量。矿物吸附材料具有较大的比表面积及孔体积,高分子保水材料具有特殊的化学基团,在土壤磷素保持与缓释方面表现出较大潜力。

前人研究表明,土壤有机质含量与碱性磷酸酶活性呈正相关^[19],而土壤碱性磷酸酶能够促进土壤中有机磷的分解转化,提高磷的生物有效性,增加土壤可利用磷素含量。本研究结果表明,环境材料与肥料配施能够提高土壤脲酶及碱性磷酸酶活性。有机肥显著影响土壤脲酶活性和碱性磷酸酶活性,配施组合 $SAP_1CBN_2AM_2CF_1OF_4$ 对提高土壤脲酶活性作用效果最好,配施组合 $SAP_3CBN_2AM_2CF_1OF_4$ 对提高碱性磷酸酶活性效果最好。

环境材料与肥料配施能够促进玉米增产。环境材料与肥料配施增加了土壤含水率,提高了土壤脲酶及碱性磷酸酶活性,增加了土壤速效氮、速效磷含量,从而提高了玉米产量。环境材料及肥料都直接

或间接地促进了玉米增产^[20-23],这与贺冬梅等^[24]、谭国波等^[25]、王延宇等^[26]研究结果基本吻合。

参考文献:

- [1] 李庆逵,朱兆良,于天仁. 中国农业发展中的肥料问题[M]. 南昌:江西科学技术出版社,1998:12-27.
- [2] 吴建富,施翔,肖青亮,等. 我国肥料利用现状及发展对策[J]. 江西农业大学学报,2003,25(5):725-727.
- [3] 吴普特,冯浩,牛文全,等. 中国用水结构发展态势与节水对策分析[J]. 农业工程学报,2003,19(1):1-6.
- [4] 黄占斌,孙在金. 环境材料在农业生产及其环境治理中的应用[J]. 中国生态农业学报,2013,21(1):88-95.
- [5] 赵先贵,肖玲. 控释肥料的研究进展[J]. 中国生态农业学报,2002,10(3):95-97.
- [6] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [7] 山本良一. 环境材料[M]. 王天民,译. 北京:化学工业出版社,1997.
- [8] 杨永辉,武继承,吴普特,等. 冬小麦不同生育阶段水分利用对保水剂与氮肥的响应[J]. 中国生态农业学报,2012,20(7):888-894.
- [9] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等. 玉米秸秆生物碳对土壤无机氮素淋失风险的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2015,34(2):310-318.
- [10] 李嘉竹,黄占斌,陈威,等. 环境功能材料对半干旱地区土壤水肥利用效率的协同效应[J]. 水土保持学报,2012,26(1):232-236.
- [11] 杨宇,金强,卢国政,等. 生化黄腐酸土壤改良剂对盐碱菜田土壤改良效果研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(4):1931-1932.
- [12] 黄震,黄占斌,孙朋成,等. 环境材料对作物吸收重金属 Pb、Cd 及土壤特性研究[J]. 环境科学学报,2012,32(10):2490-2499.
- [13] 张晓虎,李新平. 几种常用土壤含水量测定方法的研究进展[J]. 陕西农业科学,2008,6(6):114-117.
- [14] 王晓岚,卡丽毕努尔,杨文念. 土壤碱解氮测定方法比较[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(1):76-78.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [16] 杨万勤,王开运. 土壤酶研究动态与展望[J]. 应用与环境生物学报,2002,8(5):564-570.
- [17] 陈放鸣,李纯. 土壤微生物活性对林地土壤磷有效性的影响[J]. 安徽农业大学学报,1993,20(4):292-297.
- [18] 许爱霞. 旱地春小麦氮肥肥效及后效的研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2007.
- [19] 陈静,黄占斌. 腐植酸在土壤修复中的作用[J]. 腐植酸,2014,4(4):30-34,36.
- [20] Li A, Wang A Q, Chen J M. Studies of poly (acrylic acid)/attapulgite superabsorbent composite. II. Swelling behaviors of superabsorbent composite in saline solution and hydrophilic solvent-water mixture[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004,94(1):1869-1876.
- [21] Baligar V C, Fageria N K, He Z L. Nutrient use efficiency in plants[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2001,32(1):921-950.
- [22] He Z Q, Cao X Y, Mao J D, et al. Analysis of carbon functional groups in mobile humic acid and recalcitrant calcium humate extracted from eight US soils[J]. Pedosphere,2013,23(6):705-716.
- [23] Pacheco M L, Peña-Méndez E M, Havel J. Supramolecular interactions of humic acids with organic and inorganic xenobiotics studied by capillary electrophoresis [J]. Chemosphere,2003,51(2):95-108.
- [24] 贺冬梅,张崇玉,王丹妮,等. 玉米拔节期水肥耦合效应研究[J]. 水土保持研究,2008,15(3):164-166.
- [25] 谭国波,赵立群,张丽华,等. 玉米拔节期水分胁迫对植株性状、光合生理及产量的影响[J]. 玉米科学,2010,18(1):96-98.
- [26] 王延宇,王鑫,赵淑梅,等. 玉米各生育期土壤水分与产量关系的研究[J]. 干旱地区农业研究,1998,16(1):100-105.