网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.006

不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤的改良效果

王芳霞[1a,2a,2b],孙凯[1a,2a,2b],田涵[1a,2a,2b],张建国[1a,2a,2b],李雄[1a,2a,2b],沈靖杰[1b],沈锋[3]

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院,b 经济管理学院,陕西 杨凌 712100;2 农业农村部 a 西北植物营养与农业环境重点实验室,b 西北旱地农业绿色低碳重点实验室,陕西 杨凌 712100;3 杨凌锦华生态技术股份有限公司,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】分析不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤的改良效果,确定最优的施肥改良模式,以期为该地区农业高质量发展提供技术支撑。【方法】以陕西渭南典型盐渍化农田土壤为研究对象,采用田间小区试验,设置生物炭配施化肥(B)、有机肥配施化肥(OF)、生物菌肥配施化肥(BF)、单施化肥(对照,CK)4 个处理,探究了不同有机物料配施化肥对玉米拔节期和成熟期各土层土壤理化性质及玉米生长和产量的影响。【结果】①与 CK 相比,不同有机物料配施化肥处理对玉米拔节期和成熟期各土层土壤含水量有明显影响。随着土层深度的增加,不同处理土壤含水量总体呈增加的趋势。在玉米拔节期,B、OF、BF 处理 10~40 cm 土层土壤含水量明显高于 CK,其中 BF 处理高于其他处理;在玉米成熟期,B、OF、BF 处理 10~80 cm 土层土壤含水量总体低于 CK。②在玉米拔节期和成熟期,不同有机物料配施化肥处理对各土层土壤 pH、电导率和水溶性盐离子(Na^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-、CO_3^{2-}、HCO_3^-)含量有明显影响。与 CK 相比,不同有机物料配施化肥处理总体均降低了各土层土壤 pH,其中 BF 处理 0~20 cm 土层土壤 pH 降低幅度较大;OF、BF 处理总体降低了各土层土壤电导率。与 CK 相比,不同有机物料配施化肥总体降低了土壤水溶性阳离子(拔节期 K^+ 和 Ca^{2+} 除外)和阴离子(拔节期 SO_4^{2-} 和 Cl^- 除外)含量,且对浅层土壤的降低效果更显著。③在玉米拔节期和成熟期,与 CK 相比,不同有机物料配施化肥处理总体提高了土壤有机质含量;不同有机物料配施化肥处理对土壤速效磷、硝态氮和铵态氮含量有明显影响,其中 BF 处理土壤速效磷、硝态氮和铵态氮含量总体较高。④与 CK 相比,B、OF 和 BF 处理均提高了拔节期和成熟期玉米的株高及茎粗;显著提高了玉米产量,增幅分别为 22.08%,23.68%,23.77%。【结论】不同有机物料配施化肥对玉米拔节期和成熟期各土层土壤理化性质及玉米生长和产量有明显影响,其中生物菌肥配施化肥(BF)处理对盐渍化土壤的改良效果以及玉米的增产效果较佳,建议在陕西渭南地区盐渍化农田改良中推广应用。

[关键词] 盐渍化土壤;有机物料;土壤改良;陕西渭南

[中图分类号] S156.4+4 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0056-13

Improvement effects of different organic materials combined with chemical fertilizers on salinized farmland soil in Weinan, Shaanxi Province

WANG Fangxia[1a,2a,2b], SUN Kai[1a,2a,2b], TIAN Han[1a,2a,2b], ZHANG Jianguo[1a,2a,2b], LI Xiong[1a,2a,2b], SHEN Jingjie[1b], SHEN Feng[3]

(1 a *College of Natural Resources and Environment*, b *College of Economics & Management*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 2 a *Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northwest China*, b *Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northwestern China*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 3 *Yangling Jinhua Ecological Technology Co., Ltd.*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

[收稿日期] 2024-10-24 [修回日期] 2025-01-05

[基金项目] 陕西省重点研发计划项目(2022ZDLNY02-03);榆林市科技计划项目(2023-CXY-219);国家自然科学基金项目(41877541)

[作者简介] 王芳霞(1999—),女,甘肃定西人,硕士,主要从事盐碱地治理修复与利用研究。E-mail:wangfx@nwafu.edu.cn

[通信作者] 张建国(1981—),男,山东菏泽人,副教授,博士生导师,主要从事土壤物理研究。E-mail:zhangjianguo21@nwafu.edu.cn

Abstract：【Objective】Through analyzing the improving effects of different organic materials combined with chemical fertilizers on the saline farmland soil in Weinan，Shaanxi Province，this research aimed to determine the optimal fertilization improvement model，to provide technical support for the high-quality development of agriculture in this region.【Method】With typical salinized farmland soil in Weinan of Shaanxi Province as research object，a field plot experiment was conducted and four treatments were set：biochar combined with chemical fertilizer (B)，organic fertilizer combined with chemical fertilizer (OF)，biological bacterial fertilizer combined with chemical fertilizer (BF)，and single chemical fertilizer (CK). The effects of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil physical and chemical properties and maize growth and yield at jointing and mature stages were investigated.【Result】① Compared with CK，different treatments of organic materials combined with chemical fertilizer had a significant effect on soil water content in each soil layer at jointing stage and mature stage of maize. With the increase of soil depth，the soil water content of different treatments showed an increasing trend. During the jointing stage，the soil water content of 10—40 cm soil layer in B，OF and BF treatments was significantly higher than that in CK，and the soil water content in BF treatment was higher than those in other treatments. In the mature stage，the soil water content in the 10—80 cm soil layer of B，OF and BF treatments was lower than that in CK. ② In the jointing stage and mature stage of maize，different treatments of organic materials combined with chemical fertilizer had significant effects on soil pH，electrical conductivity and water-soluble salt ions (Na^+，K^+，Mg^{2+}，Ca^{2+}，SO_4^{2-}，Cl^-，CO_3^{2-}，HCO_3^-) content in each soil layer. Compared with CK，different treatments of organic materials combined with chemical fertilizer generally reduced the soil pH in each soil layer，and the soil pH in the 0—20 cm soil layer of BF treatment decreased significantly. OF and BF treatments generally reduced the soil electrical conductivity of each soil layer. Compared with CK，different treatments of organic materials combined with chemical fertilizers generally reduced soil water-soluble cations (except K^+ and Ca^{2+} at jointing stage) and anions (except SO_4^{2-} and Cl^- at jointing stage)，and the reduction effect on shallow soil was more significant. ③ In jointing stage and mature stage of maize，compared with CK，different treatments of organic materials combined with chemical fertilizer increased soil organic matter content. The combined application of different organic materials with chemical fertilizers had a significant effect on the contents of available phosphorus，nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in soil，and the contents of available phosphorus，nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in soil in BF treatment were generally higher. ④ Compared with CK，B，OF and BF treatments increased the plant height and stem diameter of maize at jointing stage and mature stage. The yield of maize was significantly increased by 22.08% in treatment B，23.68% in treatment OF and 23.77% in treatment BF，respectively.【Conclusion】Different organic materials combined with chemical fertilizers had significant effects on soil physical and chemical properties，maize growth and yield at jointing and mature stages of maize. Among them，biological bacterial fertilizer combined with chemical fertilizer showed better effect on the improvement of salinized soil and the yield increase of maize. It is suggested to be popularized and applied in the improvement of salinized farmland in Weinan area of Shaanxi Province.

Key words：saline alkali soil；organic material；soil improvement；Weinan，Shaanxi

近年来，因全球气候变化以及人类活动所导致的土壤退化已成为威胁土壤健康和粮食安全的世界性难题[1]。盐渍化是土壤退化主要表现形式之一，也是培育健康土壤的主要障碍之一[2]。由于不合理的开发利用，我国耕地面积平均每年减少约 40 万 hm^2，逐渐逼近 1.2 亿 hm^2 耕地红线[3]。据统计，我国盐渍化土地面积达 3.69×10^7 hm^2，其中盐渍化耕地面积为 9.21×10^6 hm^2，占我国耕地总面积的 6.62%，且呈现逐年扩张趋势[4]。因此，土壤盐渍化的防治以及盐渍化土壤的改良利用，已成为有效扩增我国耕地资源、保障粮食安全、促进农业高质量发展的重要举措[5-6]。

农田灌溉管理不当,易引起局部地下水位抬升,加剧土壤水溶性盐在地表的积累[7],导致盐渍化的发生。盐渍化会导致土壤理化性质恶化[8],Na^+ 会代换土壤胶体中的 Ca^{2+},破坏土壤良好结构[9],降低微生物代谢速率和酶活性[10],影响植物吸收水分[11],打破原有的离子平衡,对作物造成离子毒害[12],进而影响作物生长和产量[13]。

有机物料(有机肥、生物炭、生物菌肥等)通常作为肥料或土壤改良剂用于盐渍化土壤改良中。张雅贞等[14]研究发现,施用有机肥能降低盐渍化土壤 pH 和含盐量,且改良效果与有机肥用量存在正相关关系。REZAPOUR 等[15]发现,有机肥能显著降低盐渍化土壤 pH 和碱化度,提高土壤速效磷和速效钾含量。研究表明,生物炭能改善土壤理化性质,降低土壤盐分含量[16]。LENTZ 等[17]研究表明,施用生物炭后盐渍化土壤 pH 未发生明显变化。EL-MAHROUKY 等[18]研究表明,由于生物炭本身呈碱性,施用后会导致盐渍化土壤 pH 升高。LIU 等[19]研究发现,施用生物炭并未增加盐渍化土壤 pH,且随着生物炭施用量的增加,生物炭的氧化和分解过程会产生酸性物质,反而降低了土壤 pH。HE 等[20]发现,利用生物炭改良滨海盐渍化土壤后,土壤 pH 和 Na^+ 含量均显著下降,而 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量显著增加,盐碱胁迫程度显著减轻。生物菌肥是在肥料生产工艺中加入多种具有特殊功能菌株得到的一类新型肥料,在农业生产中应用越来越广泛。SINGH 等[21]将草酸青霉菌制成生物菌肥并施用在盐渍化土壤中,不仅使土壤有效磷和有机质含量升高,而且植物磷含量也升高,表明生物菌肥不仅能够提高土壤磷素的有效性,还能促进作物吸收磷素。

渭南地区是陕西省盐渍化土壤的集中分布区,早在 20 世纪土壤盐渍化问题便引起了关注。然而,当前该地区盐渍化土壤的改良中除了采用传统的工程措施外[22],其他综合性改良措施,特别是有机物料配施化肥在该地区应用较少,且未形成较为成熟的治理模式。因此,本研究采用田间小区试验,比较不同有机物料配施化肥对盐渍化土壤理化性质和玉米生长及产量的影响,筛选出最优的施肥改良模式,以期为渭南地区农业高质量发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省渭南市蒲城县荆姚镇赵家村(34°47′45″ N, 109°30′14″ E),地处关中平原东部,年均降水量 489.1 mm,蒸发量 1 726.4 mm,全年平均气温 15 ℃,相对湿度 64%。作物以冬小麦与夏玉米为主。根据国际制土壤质地分级标准,土壤质地为黏土,其中黏粒 51%,粉粒 34%,砂粒 15%。0～20 cm 土层含盐量为 2.31 g/kg,pH 9.13,电导率(EC)232.21 μS/cm,田间持水量 26.76%,土壤体积质量 1.52 g/cm^3,有机质含量 16.26 g/kg,有效磷含量 4.22 mg/kg,速效钾含量 298.32 mg/kg。

1.2 试验材料

供试玉米品种为榆单 88,购自陕西大地种业有限公司。供试氮肥为尿素,含 N≥46.0%;磷肥为过磷酸钙,含 P_2O_5≥12%;有机肥主要原料为羊粪,pH 6.4,有机质含量≥30%,总养分含量≥4%;生物炭是由玉米秸秆经 400 ℃缺氧条件下烧制 8 h 而成,pH 8.1,有效磷含量 0.08%,速效钾含量 1.6%,比表面积 12.5 m/g^2,灰分含量 25.4%;生物菌肥的有机质≥40%,有效活菌数(解淀粉芽孢杆菌)≥2.0×10^8 g^{-1},pH 7.4。供试化肥和有机物料均购自当地市场。

1.3 试验设计

试验共设置 4 个处理,分别为有机肥配施化肥(OF)、生物炭配施化肥(B)、生物菌肥配施化肥(BF)、单施化肥(对照,CK),每个处理设 6 个重复,共设置 24 个小区,每个小区面积 5 m×10 m=50 m^2,小区之间设 1.5 m 宽保护行,各小区随机排列。CK 参照当地传统施肥量,由于试验地的钾含量较为丰富,能够满足作物生长的基本需求,所以施用的化肥以氮肥、磷肥为主,其他处理的氮肥、磷肥施用量与 CK 相同。各处理中 60%的氮肥以及全部的磷肥、有机肥、生物炭和生物菌肥作为底肥在整地时一次性施入,剩余 40%的氮肥于玉米拔节期(2023 年 7 月 18 日)作为追肥施入。2023 年 6 月初,在各小区施入底肥后,对土壤进行翻耕(翻耕深度约 20 cm),平整土地后播种夏玉米,播种密度为 67 500 株/hm^2,株距 30～35 cm、行距 40～45 cm,播种深度为 4～5 cm,于 10 月份收获。不同处理有机物料和化肥的施用量如表 1 所示。

1.4 样品采集与测定

分别于玉米播种前(作为基础数据)、拔节期和成熟期采集土壤样品,在各试验小区用直径为 5 cm 的土钻采集 0～5,5～10,10～20,20～40,40～60,60～80,80～100 cm 土层土样,每层取土样约 500 g,去除根系等杂质,密封保存并带回实验室进行各指标的测定。

表 1　不同处理有机物料与化肥的施用量

Table 1　Fertilization plan of different organic materials combined with chemical fertilizers　kg/hm²

处理 Treatment	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	有机肥 Organic fertilizer	生物炭 Biochar	生物菌肥 Biofertilizer
CK	600	1 875	0	0	0
OF	600	1 875	10 000	0	0
B	600	1 875	0	15 000	0
BF	600	1 875	0	0	5 000

土壤含水量采用 105 ℃ 24 h 烘干法测定；pH 和电导率值均采用便携式 pH-电导率仪（美国 ETECH®）测定，其中测定 pH 时的水土体积质量比为 2.5∶1，测定电导率时的水土体积质量比为 5∶1；土壤盐离子（K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}、HCO_3^-）含量采用鲍士旦[23]的方法测定；土壤速效磷含量采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定；土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量用 1 mol/L KCl 溶液浸提-AA3 型连续流动分析仪测定；土壤有机质含量使用重铬酸钾外加热法测定。

在玉米拔节期（2023 年 7 月 17 日）和成熟期（2023 年 8 月 22 日），采用游标卡尺、皮尺分别测量茎粗、株高，并于成熟期选择无缺苗、断垄且生长状况良好的 2 行玉米收获，晒干后用电子天平称质量作为生物量；然后脱粒，用电子天平称其千粒质量，计算玉米产量。

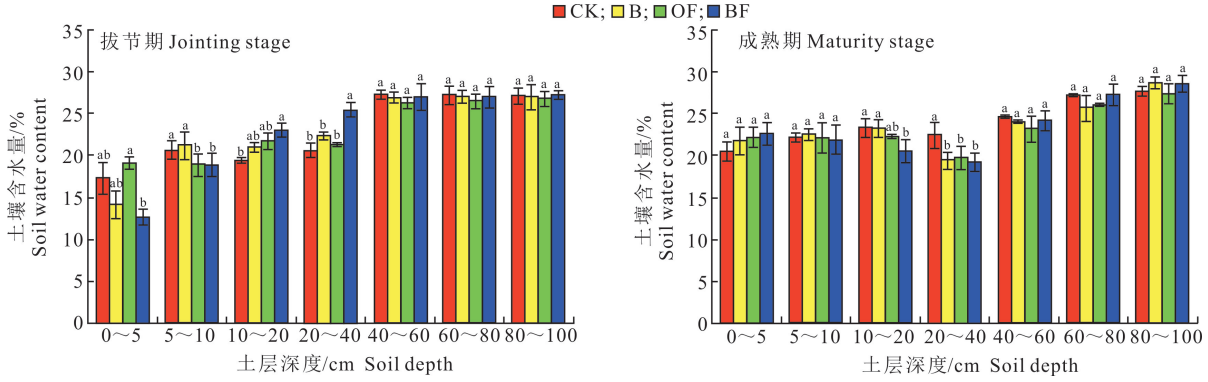
1.5　数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件处理数据，使用 SPSS 17.0 软件进行统计分析，差异显著性检验采用 Duncan's 法（$P<0.05$）。

2　结果与分析

2.1　不同有机物料配施化肥对土壤含水量的影响

由图 1 可知，在玉米拔节期和成熟期，与 CK 相比，不同有机物料配施化肥对土壤含水量有明显影响。随着土层深度的增加，拔节期不同处理玉米土壤含水量总体呈增加趋势，之后趋于稳定；成熟期土壤含水量总体先下降后升高。在拔节期，BF 处理 0～10 cm 土层土壤含水量均低于 CK；在 10～40 cm 土层，B、OF、BF 处理土壤含水量明显高于 CK，其中 BF 处理土壤含水量最高；在 40～100 cm 土层，4 个处理土壤含水量差异不显著。在玉米成熟期，4 个处理 0～10 cm 土层土壤含水量差异不显著；在 10～80 cm 土层，B、OF、BF 处理土壤含水量总体低于 CK；在 80～100 cm 土层，B、BF 处理土壤含水量高于 CK，OF 处理土壤含水量低于 CK。



CK. 单施化肥（对照）；B. 生物炭配施化肥；OF. 有机肥配施化肥；BF. 生物菌肥配施化肥。

图柱上标不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

CK. Single application of chemical fertilizer (control); B. Biochar combined with chemical fertilizers; OF. Organic fertilizer combined with chemical fertilizers; BF. Bio-bacterial fertilizer combined with chemical fertilizers.

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments in the same soil layer ($P<0.05$). The same below.

图 1　不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤含水量的影响

Fig. 1　Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil water content of salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

2.2　不同有机物料配施化肥对土壤 pH、电导率和盐分含量的影响

2.2.1　对土壤 pH 的影响　由图 2 可知，在玉米拔节期和成熟期，与 CK 相比，不同有机物料配施化肥总体均降低了土壤 pH 值，且对 0～40 cm 土层 pH 的降低效果更为明显，其中 BF 处理的效果最明显。

随着土层深度的增加,不同生育期各处理土壤 pH 总体呈升高趋势。在拔节期,与 CK 相比,B、OF、BF 处理 0～40 cm 土层 pH 值均有不同程度的降低;在 40～100 cm 土层,4 个处理土壤 pH 总体趋于稳定,差异不显著。在成熟期,与 CK 相比,B、OF、BF 处理 0～20 cm 土层土壤 pH 值降低幅度分别为 0.95%～1.14%,2.11%～4.42%,2.59%～7.75%;在 20～100 cm 土层,B、OF、BF 处理土壤 pH 值均低于 CK,但是差异均不显著。

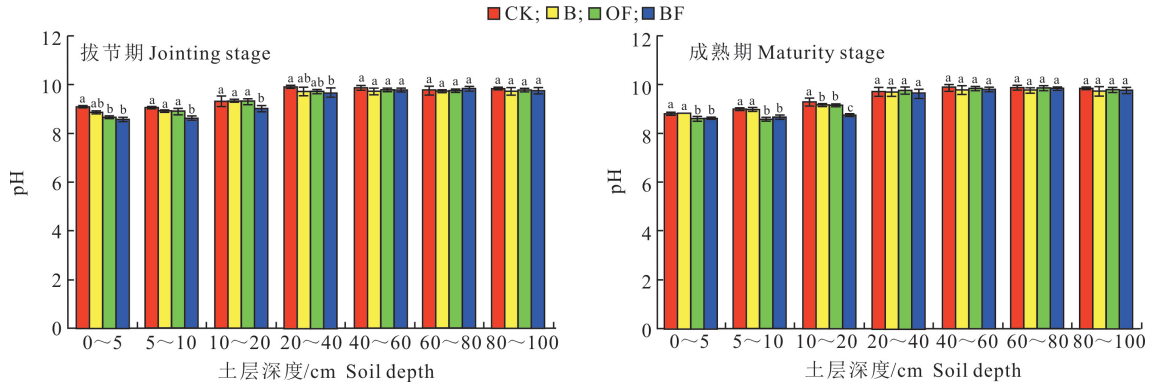


图 2 不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 pH 的影响

Fig. 2 Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil pH of salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

2.2.2 对土壤电导率的影响 由图 3 可知,在玉米拔节期和成熟期,与 CK 相比,不同有机物料配施化肥总体降低了土壤 EC(拔节期 B 处理除外);随着土层深度的增加,不同处理土壤 EC 总体先降低后增大再降低。在拔节期,与 CK 相比,OF、BF 处理明显降低了 0～100 cm 土层 EC,降幅分别为 7.12%～27.72%,3.83%～19.67%;B 处理提高了 0～10 cm 土层土壤 EC,其对 10～100 cm 土层土壤 EC 影响不显著。在成熟期,与 CK 相比,B、OF、BF 处理均降低了各土层土壤 EC,降幅分别为 3.38%～12.23%,6.51%～22.45%,5.44%～24.53%。

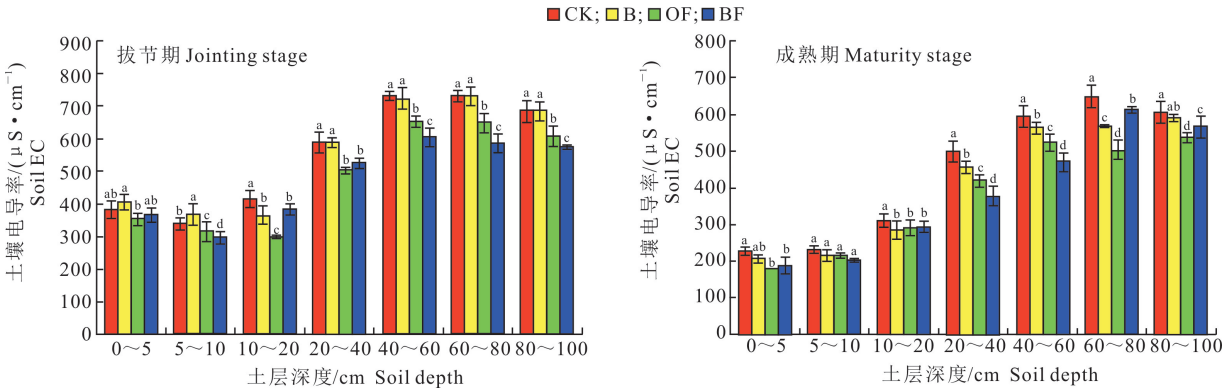


图 3 不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤电导率(EC)的影响

Fig. 3 Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil EC of salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

2.2.3 对水溶性盐离子含量的影响 由图 4～11 可知,与 CK 相比,不同有机物料配施化肥总体均降低了土壤水溶性阳离子(拔节期 K^+ 和 Ca^{2+} 除外)和阴离子(拔节期 SO_4^{2-} 和 Cl^- 除外)含量,且对浅层土壤的降低效果更显著。

如图 4 所示,在玉米拔节期和成熟期,与 CK 相比,不同有机物料配施化肥均降低了 0～40 cm 土层土壤 Na^+ 含量。在拔节期,不同处理 0～40 cm 土层 Na^+ 含量的降低幅度由大到小表现为 B>BF>OF,其中 B 处理土壤 Na^+ 含量显著低于其他处理。在成熟期,与 CK 相比,B、OF、BF 处理 0～40 cm 土层土壤 Na^+ 含量明显降低,40～100 cm 土层土壤 Na^+ 含量无显著变化。

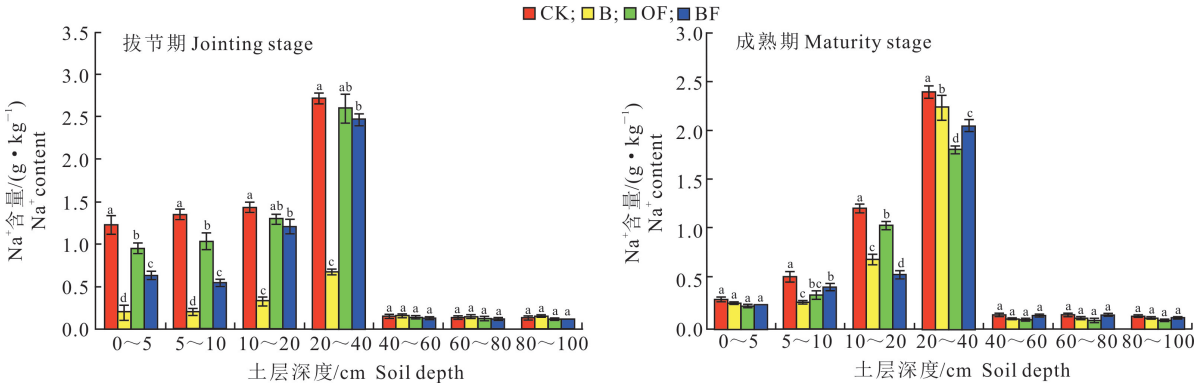


图 4　不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 Na^+ 含量的影响

Fig. 4　Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil Na^+ content in salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

由图 5 可知，在拔节期，与 CK 相比，不同有机物料配施化肥增加了 0～20 cm 土层土壤 K^+ 含量，B、OF、BF 处理增幅分别为 22.92%～91.61%，29.62%～149.35%，88.23%～136.99%；在 20～40 cm 土层，OF 处理土壤 K^+ 含量显著高于其他处理；在 40～60 cm 土层，各处理土壤 K^+ 含量总体趋于稳定，差异不显著；在 60～100 cm 土层，B、BF、OF 处理 K^+ 含量均显著低于 CK。在成熟期，B、OF、BF 处理土壤 K^+ 含量均显著低于 CK，降幅分别为 10.63%～32.52%，7.36%～55.11%，16.01%～47.65%。

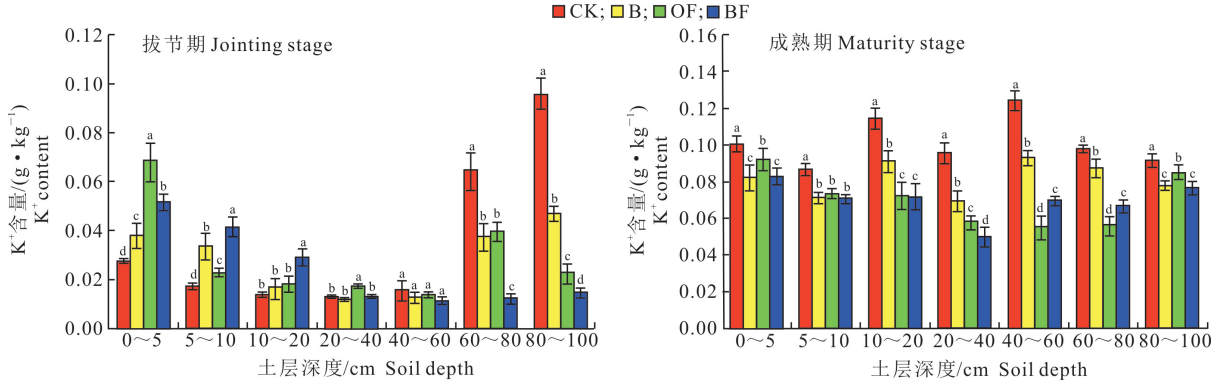


图 5　不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 K^+ 含量的影响

Fig. 5　Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil K^+ content in salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

图 6 显示，在拔节期，与 CK 相比，B、OF 处理明显降低了 0～20 cm 土层土壤 Ca^{2+} 含量，而 BF 处理显著增加了土壤 Ca^{2+} 含量；在 20～100 cm 土层，4 个处理土壤 Ca^{2+} 含量差异不显著。在成熟期，B、OF、BF 处理均显著降低了各土层土壤 Ca^{2+} 含量。

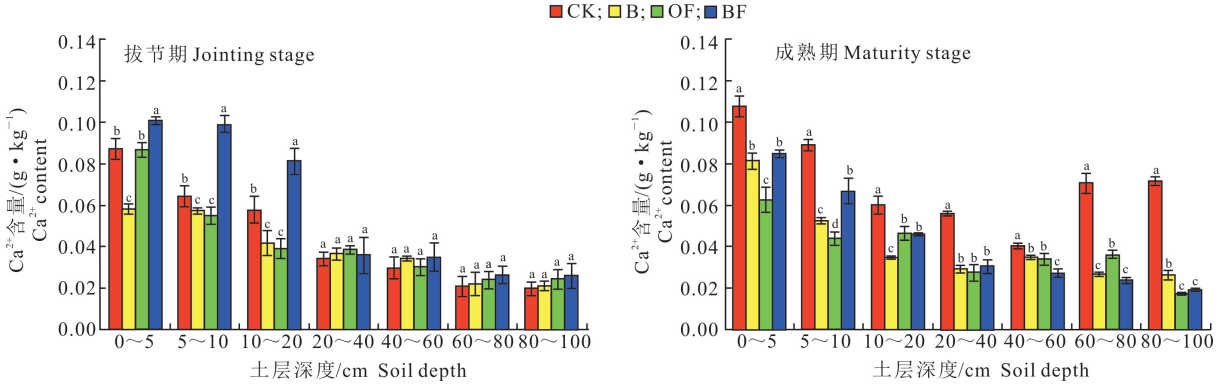


图 6　不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 Ca^{2+} 含量的影响

Fig. 6　Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil Ca^{2+} content in salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

由图 7 可知,在拔节期,与 CK 相比,不同有机物料配施化肥均显著降低了 0～40 cm 土层土壤 Mg^{2+} 含量,B、OF 处理降幅显著大于 BF 处理;在 40～100 cm 土层,4 个处理土壤 Mg^{2+} 含量差异不显著。在成熟期,B、OF、BF 处理 0～60 cm 土层土壤 Mg^{2+} 含量显著低于 CK;在 60～100 cm 土层,4 个处理土壤 Mg^{2+} 含量差异不显著。

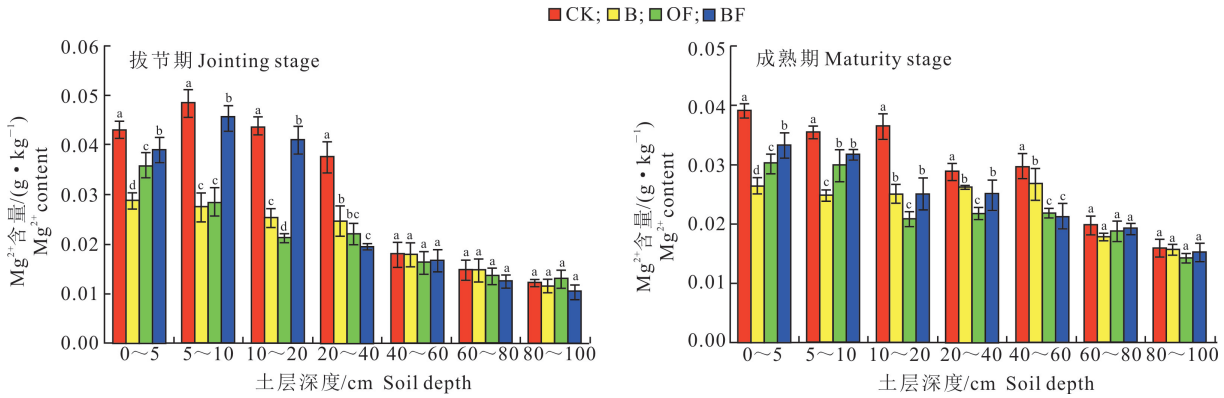


图 7 不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 Mg^{2+} 含量的影响

Fig. 7 Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil Mg^{2+} content in salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

如图 8 所示,在拔节期,在 0～40 cm 土层,不同有机物料配施化肥均可增加土壤 SO_4^{2-} 含量,其中 B 处理的增幅明显高于 OF、BF 处理;在 40～80 cm 土层,各处理间土壤 SO_4^{2-} 含量差异不显著;在 80～100 cm 土层,BF 处理土壤 SO_4^{2-} 含量显著低于其他处理。在成熟期,B、OF、BF 处理明显降低了 0～60 cm 土层 SO_4^{2-} 含量;60～100 cm 土层,4 个处理间差异不显著。

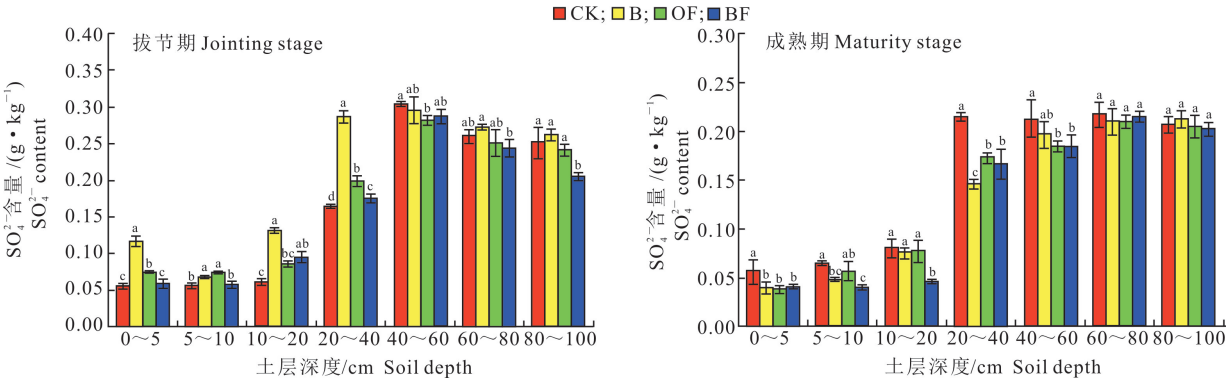


图 8 不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 SO_4^{2-} 含量的影响

Fig. 8 Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil SO_4^{2-} content in salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

图 9 显示,不同有机物料配施化肥处理土壤中 Cl^- 含量与 SO_4^{2-} 含量的整体变化趋势基本一致,即随土层深度增加,土壤 Cl^- 含量总体呈增加趋势。在拔节期,B、OF 处理 0～10 cm 土层土壤 Cl^- 含量显著高于 CK,BF 与 CK 处理间差异不显著;在 10～40 cm 土层,B 处理土壤 Cl^- 含量明显高于其他处理;40～100 cm 土层,4 个处理土壤 Cl^- 含量趋于稳定,差异不显著。在成熟期,B、OF、BF 处理 0～40 cm 土层土壤 Cl^- 含量均低于 CK;在 40～100 cm 土层,B 处理土壤 Cl^- 含量显著高于 CK,OF、BF 处理土壤 Cl^- 含量与 CK 差异不显著。

如图 10 所示,在拔节期和成熟期,各处理 0～20 cm 土层中均未测出 CO_3^{2-};不同有机物料配施化肥均明显降低了 20～100 cm 土层 CO_3^{2-} 含量,且 B 处理土壤 CO_3^{2-} 含量的降幅总体大于 OF、BF 处理。

由图 11 可知,与 CK 相比,不同有机物料配施化肥均明显降低了各土层土壤 HCO_3^- 含量,其中拔节期 BF 处理降幅总体较高;成熟期 0～40 cm 土层 BF 处理降幅较大,40～100 cm 土层 B 处理降幅较大。

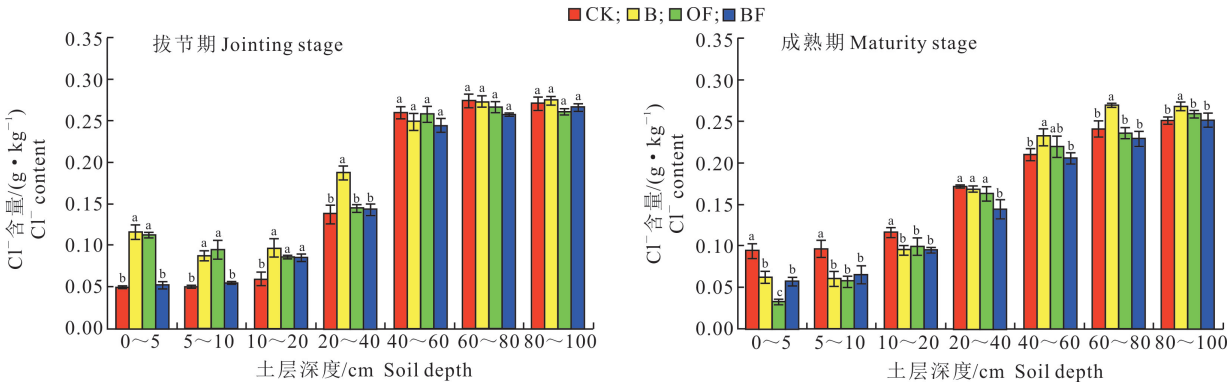


图 9　不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 Cl^- 含量的影响

Fig. 9　Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil Cl^- content in salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

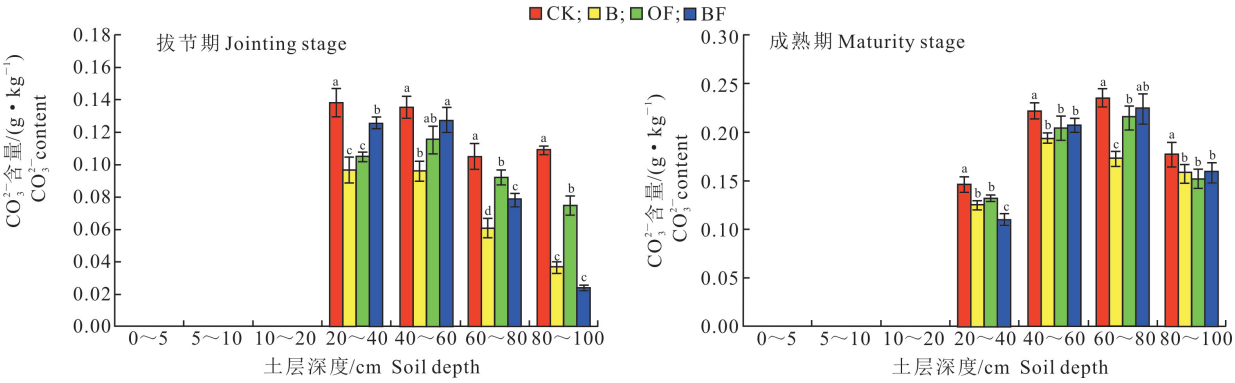


图 10　不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 CO_3^{2-} 含量的影响

Fig. 10　Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil CO_3^{2-} content in salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

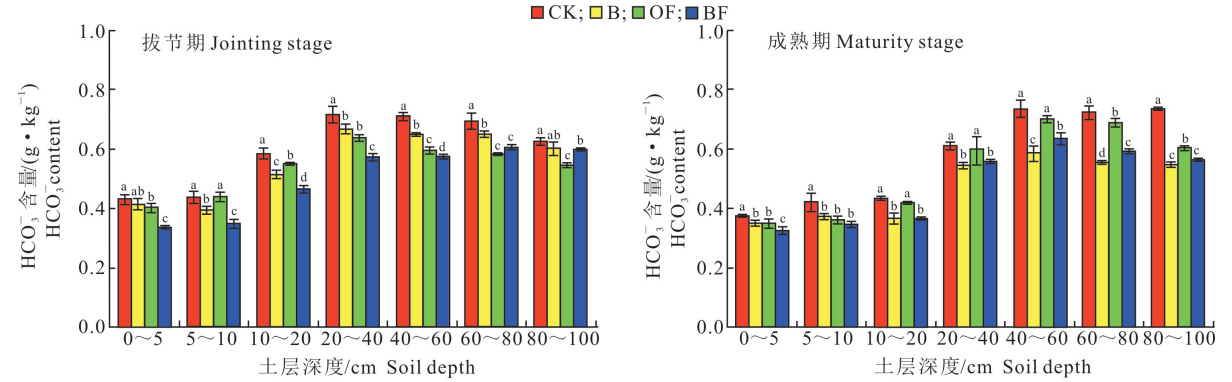


图 11　不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 HCO_3^- 含量的影响

Fig. 11　Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil HCO_3^- content in salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

2.3　不同有机物料配施化肥对土壤养分含量的影响

2.3.1　对土壤有机质含量的影响　由图 12 可知，在拔节期和成熟期，与 CK 相比，不同有机物料配施化肥总体增加了土壤有机质含量（$P<0.05$）；且随着土层深度的增加，各处理土壤有机质含量总体降低。在拔节期，B、OF、BF 处理 0～40 cm 土壤有机质含量总体显著高于 CK；各处理 40～100 cm 土层土壤有机质含量趋于稳定，差异不显著。在成熟期，除了 20～40，60～80 cm 土层，B、BF 处理其余土层土壤有机质含量显著高于 CK；OF 处理 0～5 cm 土层土壤有机质含量较 CK 显著增加了 10.47%，而在

5～100 cm 土层与 CK 无显著差异。

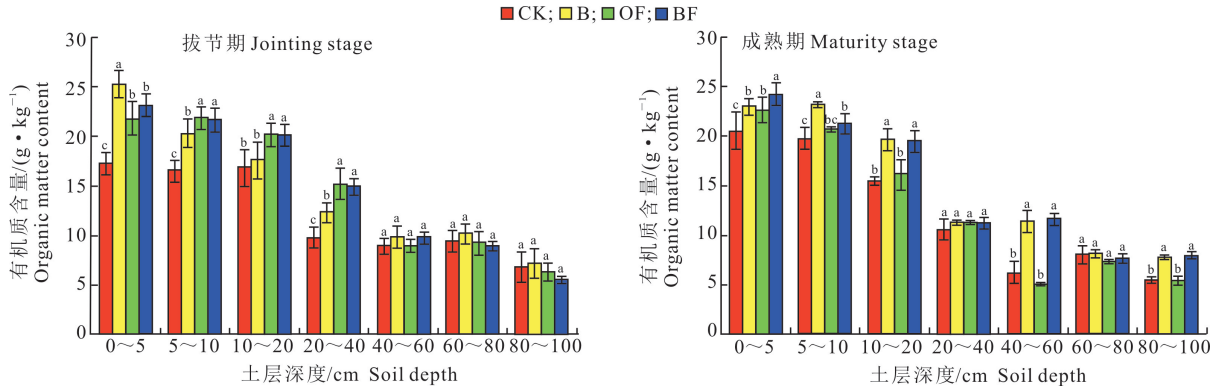


图 12 不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤有机质含量的影响

Fig. 12 Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil organic matter content of salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

2.3.2 对土壤速效磷含量的影响 如图 13 所示，与 CK 相比，不同有机物料配施化肥对土壤速效磷含量有明显影响，且增加了 0～20 cm 土层土壤速效磷含量。在拔节期，BF 处理各土层土壤速效磷含量最高，总体显著高于其他处理；而 B、OF 处理仅显著增加了 0～5 cm 土层土壤速效磷含量。成熟期，B、BF 处理各土层的土壤速效磷含量总体显著高于 CK；OF 处理 0～20 cm 土层土壤速效磷含量显著高于 CK，20～100 cm 土层与 CK 差异不显著。

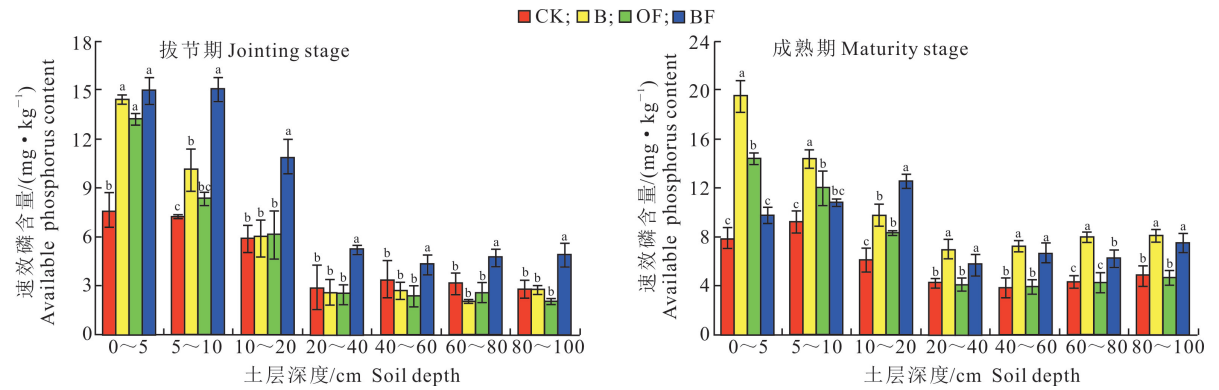


图 13 不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤速效磷含量的影响

Fig. 13 Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil available phosphorus content of salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

2.3.3 对土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量的影响 不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 含量的影响见图 14。由图 14 可知，在拔节期和成熟期，不同有机物料配施化肥处理 0～20 cm 土层 NO_3^--N 含量存在显著差异（$P<0.05$）。在拔节期，在 0～20 cm 土层，B、OF、BF 处理土壤 NO_3^--N 含量显著低于 CK；在 20～100 cm 土层，各处理土壤 NO_3^--N 含量差异不显著。在成熟期，在 0～40 cm 土层，与 CK 相比，不同有机物料处理总体增加了土壤 NO_3^--N 含量；在 40～100 cm 土层，各处理土壤 NO_3^--N 含量差异不显著。

由图 14 还可知，在玉米拔节期，在 0～40 cm 土层，与 CK 相比，OF、BF 处理土壤 NH_4^+-N 含量无显著变化，而 B 处理土壤 NH_4^+-N 含量显著增加；在 40～100 cm 土层，各处理土壤 NH_4^+-N 含量无显著差异。成熟期，与 CK 相比，OF、BF 处理明显增加了 0～20 cm 土层 NH_4^+-N 含量，而在 20～100 cm 土层 NH_4^+-N 含量并无显著变化；但 B 处理 0～60 cm 土层 NH_4^+-N 含量明显降低，60～100 cm 土层土壤 NH_4^+-N 含量略有增加。

2.4 不同有机物料配施化肥对玉米生长和产量的影响

如表 2 所示，不同有机物料配施化肥总体显著提高了拔节期和成熟期玉米的株高（成熟期 B 处理除外）。拔节期，与 CK 相比，B、OF、BF 处理玉米株高的增幅分别为 13.73%，23.39%，17.18%，且 OF

和 BF 处理显著高于 B 处理；成熟期，OF、BF 处理玉米株高较 CK 分别显著增加了 2.97%，2.18%，B 处理玉米株高与 CK 差异不显著。不同有机物料配施化肥明显增加了拔节期和成熟期玉米的茎粗，但各处理间差异均不显著。不同有机物料配施化肥均显著提高了玉米的生物量、千粒质量和产量。从生物量来看，B 处理增幅较高，为 30.80%。从千粒质量和产量来看，BF 处理增幅较高，分别为 7.12%和 23.77%。

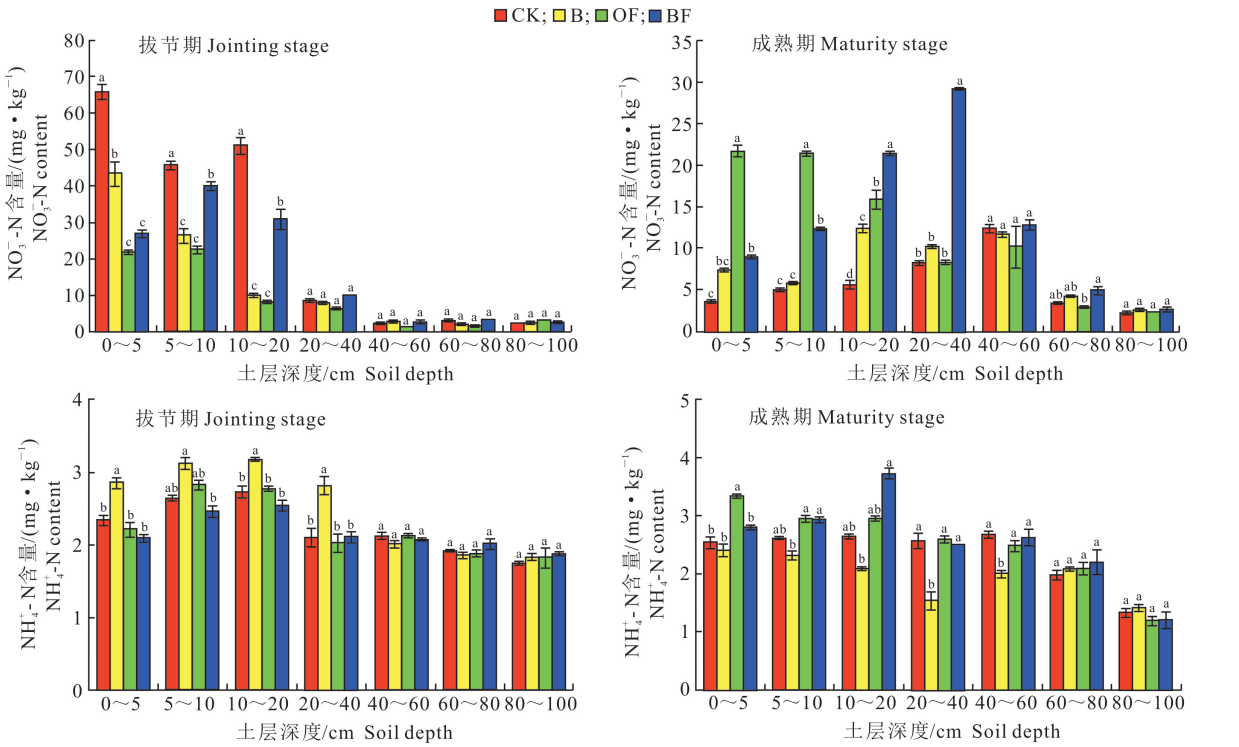


图 14　不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量的影响

Fig. 14　Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil NO_3^--N and NH_4^+-N content of salinized farmland in Weinan, Shaanxi Province

表 2　不同有机物料配施化肥对玉米生长和产量的影响

Table 2　Effect of different organic materials combined with chemical fertilizers on maize growth and yield

处理 Treatments	株高/cm Plant height		茎粗/cm Stem thickness		生物量/(kg·hm^{-1}) Biomass	千粒质量/g Thousand grain weight	产量/(kg·hm^{-2}) Yield
	拔节期 Jointing stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	成熟期 Maturity stage			
CK	46.6±1.26 c	229.1±1.52 c	12.5±1.65 a	20.8±1.45 a	13 032±0.013 c	245.5±5.2 c	7 023.93±196.73 b
B	53.0±0.94 b	231.3±1.64 bc	13.8±1.85 a	20.9±1.52 a	17 046±0.008 a	253.3±6.0 b	8 574.98±123.83 a
OF	57.5±0.85 a	235.9±2.29 a	12.5±1.34 a	21.5±1.32 a	15 948±0.009 ab	253.8±7.9 b	8 616.61±315.15 a
BF	54.9±1.45 a	234.1±1.45 ab	13.5±1.62 a	21.2±1.37 a	15 624±0.009 b	263.2±8.0 a	8 693.31±194.22 a

3　讨　论

本研究中，在玉米成熟期，不同有机物料配施化肥处理 20～80 cm 土层土壤含水量低于 CK，这是因为不同有机物料配施化肥促进了玉米生长，导致其根系吸收水分增多，从而降低了土壤含水量。玉米拔节期，生物炭和生物菌肥分别配施化肥处理土壤含水量均随着土层深度的增大总体增加，这可能是生物炭和生物菌肥配施会促进有机物质分解，增加土壤表层孔隙度和团聚体[24]，土壤表层水分下渗，从而增加土壤含水量。在玉米成熟期，生物炭配施化肥处理 0～10 cm 土层土壤含水量较 CK 升高，这是因为生物炭自身具有丰富的孔隙结构，亲水性表面极性含氧官能团与土壤水分形成氢键而持有水分，从而提高了土壤的保水能力[25]。

土壤 pH 反映了土壤酸碱和盐渍化程度，会影响土壤养分的有效性与转化过程以及微生物活性等，土壤 pH 过高或过低都会影响作物的正常生长。本研究中，生物炭配施化肥处理降低土壤 pH 的效果总体并不显著。这是因为生物炭本身的碱性矿物组分较多，施入土壤后会释放碱性物质，提高土壤 pH[26]。本研究中，在玉米拔节期，有机肥配施化肥

处理土壤 pH 降低幅度小于成熟期,这与鄢入洋[27]的研究结果相似,这是因为有机肥本身偏酸性,且有机肥分解产生的有机酸也会部分降低土壤 pH。本研究中,与 CK 相比,生物菌肥配施化肥处理土壤 pH 下降幅度较大,这是因为生物菌肥施入土壤后,增加了土壤微生物的数量及活性,其代谢活动会产生酸性物质,缓解盐碱胁迫[28]。

EC 是反映土壤水溶性盐含量高低的重要指标,高浓度的土壤可溶性盐会损伤植物细胞结构,从而造成植株根系死亡。本研究中,玉米成熟期土壤 EC 低于拔节期,这是因为玉米生长过程中,根系会从土壤中吸收部分可溶性盐,使土壤盐分含量降低。本研究中,玉米拔节期,生物炭配施化肥处理 0～10 cm 土层土壤 EC 较 CK 明显提高了 6.36%～8.00%,这可能与生物炭本身的高含盐量有关。在拔节期及成熟期,与 CK 相比,有机肥和生物菌肥分别配施化肥处理土壤 EC 均显著降低,表明有机肥和生物菌配施化肥能改良盐渍化土壤,主要是有机肥和生物菌肥中的有机质对土壤盐分离子有吸附作用所致,这与 LIU 等[29]对盐渍化土壤的研究结果一致。

本研究中,除玉米拔节期 0～40 cm 土层土壤 K^+、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^- 含量外,生物炭、有机肥和生物菌肥分别配施化肥处理总体降低了拔节期和成熟期土壤水溶性盐离子含量,且对浅层土壤的淋洗效果更明显,这与其他学者的研究结果[29-31]一致。在玉米拔节期,3 种有机物料配施化肥处理均增加了 0～20 cm 土层土壤 K^+ 含量,可能是由于在作物生长前期,生物炭会吸附土壤中的 Na^+ 并释放 K^+,维持较高的 K^+/Na^+[32];有机肥和生物菌肥分别配施化肥后短期内会向土壤中大量释放 K^+,提高土壤 K^+/Na^+,有利于促进作物的生长[29]。玉米拔节期,与 CK 相比,生物菌肥配施化肥处理各土层土壤 Ca^{2+} 含量总体增加,土壤 Ca^{2+} 能置换 Na^+,Ca^{2+} 含量升高能降低土壤 Na^+ 含量,有利于盐渍化土壤的改良[32]。3 种有机物料配施化肥处理增加了拔节期 0～40 cm 土层土壤 SO_4^{2-} 含量,可能是因为生物炭本身 SO_4^{2-} 含量较高,施用后短期内会大幅增加土壤 SO_4^{2-} 含量;有机肥和生物菌肥会促进化肥中的 SO_4^{2-} 释放到土壤中[33]所致。

本研究中,生物炭、有机肥和生物菌肥分别配施化肥处理后均提高了盐渍化土壤有机质含量,这与前人的研究结果[7]一致。这是因为生物菌肥改善土壤结构,优化土壤微生物种群,增加有机质含量[34];生物炭中易降解部分能够提供能量来显著促进微生物的生长,从而促进土壤有机物合成[35]。

土壤中的大部分磷为植物无法吸收利用的难溶态磷,只有少部分速效态磷能被植物吸收利用。本研究结果表明,不同有机物料配施化肥处理后提高了 0～20 cm 土层土壤速效磷含量,其中玉米拔节期生物菌肥配施化肥处理的提升效果总体最明显,这与李翠兰等[36]的研究结果一致。这是因为生物菌肥不仅能够促进根系生长,其中的解磷细菌还能溶解土壤磷,增加速效磷含量[36]。生物炭和有机肥不仅可为作物生长提供磷源,而且生物炭还能提高土壤中可溶解磷酸盐的硫酸菌、假单胞菌和黄杆菌的相对丰度和分布;有机肥矿化过程中产生的有机酸会溶解盐渍土中的磷酸盐,增加磷元素的有效性[37]。

土壤中能被植物吸收利用的氮主要为 NO_3^--N、NH_4^+-N,其与作物生长和产量关系密切。本研究中,玉米拔节期,生物炭、有机肥和生物菌肥分别配施化肥处理 0～20 cm 土层土壤 NO_3^--N 含量均低于 CK,可能与氮素的淋溶和硝化作用有关[38]。与 CK 相比,生物炭配施化肥处理降低了拔节期 0～20 cm 土层土壤 NO_3^--N 含量,增加了 NH_4^+-N 含量,这与前人的研究结果[39]相似。这是因为在生物炭施用前期,氮素转化以氨化作用为主,积累了较多的 NH_4^+-N。在玉米成熟期,有机肥和生物菌肥分别配施化肥处理 0～20 cm 土层土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 含量均高于 CK。这是因为有机肥和生物菌肥还会通过各种生理生化反应将土壤矿质氮转化为有效氮。在玉米成熟期,生物炭配施化肥处理 0～40 cm 土层土壤 NH_4^+-N 含量降低,而 NO_3^--N 含量升高,可能是因为生物炭促进土壤 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N,促进了土壤硝化作用[40]。

本研究结果表明,与 CK 相比,有机物料配施化肥处理玉米株高和茎粗均提高,这与前人的研究结果[41]一致,其中生物炭配施化肥处理玉米株高的增幅虽然相对较低,但并未出现抑制作用,这与张晗芝等[42]的研究结果不太一致,这可能与生物炭的原料和生产条件不同有关。

本研究中,与 CK 相比,3 种有机物料配施化肥处理均能增加玉米的生物量和产量。一方面是因为在盐渍化土壤中施入这 3 种有机物料会增加土壤保水性,不同程度降低土壤 pH,较好地抑制了盐分对玉米生长的胁迫;另一方面,施入这 3 种有机物料不仅可增加耕层土壤养分含量,还可以活化土壤中的潜在养分,促进玉米对氮、磷、钾的吸收,增加玉米的

生物量和千粒质量，进而显著提高了玉米产量。

4　结　论

与 CK 相比，生物炭、有机肥、生物菌肥配施化肥均能明显改善盐渍化土壤理化性质，其中生物菌肥配施化肥处理能明显提高拔节期 10～40 cm 土层土壤含水量，降低 0～40 cm 土层土壤 pH 以及 0～100 cm 土层电导率和成熟期 Na^+、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^- 含量；生物炭配施化肥处理可明显降低各土层土壤 CO_3^{2-}、HCO_3^- 含量；有机肥配施化肥处理可明显降低各土层土壤 K^+ 和 Mg^{2+} 含量。在拔节期和成熟期，生物炭配施化肥处理能明显增加各土层土壤有机质含量，生物菌肥配施化肥处理能明显提高成熟期各土层土壤速效磷、NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量。不同有机物料配施化肥处理均能明显促进玉米生长，提高产量，其中生物菌肥配施化肥处理的增产效果最佳，建议在生产中推广应用。

[参考文献]

[1] 陶汪海，邓铭江，王全九，等. 西北旱区农业高质量发展体系的生态农业内涵与路径[J]. 农业工程学报，2023，39(20)：221-232.
TAO W H，DENG M J，WANG Q J，et al. Ecological agriculture connotation and pathway of high-quality agricultural development system in Northwest arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39(20)：221-232.

[2] 李建国，濮励杰，朱明，等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报，2012，67(9)：1233-1245.
LI J G，PU L J，ZHU M，et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research[J]. Acta Geographica Sinica，2012，67(9)：1233-1245.

[3] 刘淼，王志春，杨福，等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. 水土保持学报，2021，35(3)：1-8.
LIU M，WANG Z C，YANG F，et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2021，35(3)：1-8.

[4] 曹莹菲，赵毅，赵文田，等. 硫磺改良对宁夏引黄灌区盐碱土 pH 及微量元素有效性的影响研究[J]. 干旱地区农业研究，2010，28(3)：199-201.
CAO Y F，ZHAO Y，ZHAO W T，et al. Research on effect of sulfur application on saline-alkaline soil pH and availability of trace elements in Huanghe River irrigation district in Ningxia [J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2010，28(3)：199-201.

[5] 李彬，王志春，孙志高，等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究，2005，23(2)：154-158.
LI B，WANG Z C，SUN Z G，et al. Resources and sustainable resource exploitation of salinized land in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2005，23(2)：154-158.

[6] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报，2008，45(5)：837-845.
YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica，2008，45(5)：837-845.

[7] 徐国凤，同延安. 不同改良措施对卤阳湖盐碱地土壤性质及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究，2019，37(3)：232-237.
XU G F，TONG Y A. Effect of soil properties and maize yield in different improvement measures of saline-alkali soil in Luyang Lake[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2019，37(3)：232-237.

[8] LIU Q，MEKI K，ZHENG H，et al. Biochar application in remediating salt-affected soil to achieve carbon neutrality and abate climate change[J]. Biochar，2023，5(1)：45.

[9] SAYGIN S D，OZTURK H S，AKCA M O，et al. Solute transport through undisturbed carbonatic clay soils in dry regions under differing water quality and irrigation patterns[J]. Geoderma，2023，434：116489.

[10] QADEER A，WAKEEL A，CHEEMA S A，et al. Integrated impacts of soil salinity and drought stresses on the decomposition of plant residues[J]. Sustainability，2024，16(13)：5368.

[11] 张贵芹，王洪章，郭新送，等. 有机物料投入对滨海盐碱地土壤理化性状和夏玉米产量形成的影响[J]. 作物学报，2024，50(9)：2323-2334.
ZHANG G Q，WANG H Z，GUO X S，et al. Effects of organic material inputs on soil physicochemical properties and summer maize yield formation in coastal saline-alkali land[J]. Acta Agronomica Sinica，2024，50(9)：2323-2334.

[12] 倪同坤，王卫军. 射阳县土壤次生盐渍化的成因及防治对策[J]. 节水灌溉，2005(4)：50-51.
NI T K，WANG W J. Causes and control countermeasures of soil secondary salinization in Sheyang County[J]. Water Saving Irrigation，2005(4)：50-51.

[13] 张瑞，杨昊，张芙蓉，等. 生物竹炭改良崇明滩涂盐渍化土壤的试验研究[J]. 农业环境科学学报，2014，33(12)：2404-2411.
ZHANG R，YANG H，ZHANG F R，et al. Effects of bamboo biochar on coastal saline soils of Chongming Island，Shanghai [J]. Journal of Agro-Environment Science，2014，33(12)：2404-2411.

[14] 张雅贞，李跃进，景宇鹏，等. 施用有机肥对土默川平原盐碱土土壤盐分及养分特征的影响[J]. 北方农业学报，2019，47(6)：34-41.
ZHANG Y Z，LI Y J，JING Y P，et al. Effect of increasing amounts of organic fertilizer on the soil salinity and nutrient characteristics of saline-alkaline soil in Tumochuan Plain[J]. Journal of Northern Agriculture，2019，47(6)：34-41.

[15] REZAPOUR S，ASADZADEH F，BARIN M，et al. Organic amendments improved the chemical-nutritional quality of saline-sodic soils[J]. International Journal of Environmental Science and Technology，2022，19(6)：4659-4672.

[16] AL-WABEL M I, HUSSAIN Q, USMAN A R A, et al. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: a review[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(7): 2124-2161.

[17] LENTZ R D, IPPOLITO J A. Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake[J]. Journal of Environmental Quality, 2014, 43(2): 775.

[18] EL-MAHROUKY M, EL-NAGGAR A H, USMAN A R, et al. Dynamics of CO_2 emission and biochemical properties of a sandy calcareous soil amended with *Conocarpus* waste and biochar[J]. Pedosphere, 2015, 25(1): 46-56.

[19] LIU J, SCHULZ H, BRANDL S, et al. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(5): 698-707.

[20] HE K, HE G, WANG C P, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes *Miscanthus* growth in a coastal saline-alkali soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103674.

[21] SINGH H, REDDY M S. Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils[J]. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(1): 30-34.

[22] 徐明岗, 龚家柯. 渭南盐渍土的性质及改良利用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1993, 21(S1): 73-78.
XU M G, GONG J K. Properties and improvement of saline soil in Weinan[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 1993, 21(S1): 73-78.

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-34.

[24] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1): 235-246.

[25] MAHMOUD E K, EL-BESHBESHY T R, EL-KADER N E. Biochar impacts on physical properties and wheat yield of salt affected soils[J]. International Journal of Scientific and Research Publication, 2017, 2(1): 1-10.

[26] ZHANG P, BING X, JIAO L, et al. Amelioration effects of coastal saline-alkali soil by ball-milled red phosphorus-loaded biochar[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431: 133904.

[27] 鄢入洋. 有机配肥对盐碱土-高丹草中氮素转化吸收的作用及微生物学机制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
YAN R P. Effect of organic fertilizer on nitrogen transformation and absorption in saline-alkali soil-*Sorghum sudanense* and its microbial mechanism[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.

[28] SHAN S P, WEI Z W, CHENG W, et al. Biofertilizer based on halotolerant microorganisms promotes the growth of rice plants and alleviates the effects of saline stress[J]. Frontiers in microbiology, 2023, (14): 1165631-1165631.

[29] LIU R, TANG M, LUO Z H, et al. Straw returning proves advantageous for regulating water and salt levels, facilitating nutrient accumulation, and promoting crop growth in coastal saline soils[J]. Agronomy, 2024, 14(6): 1196.

[30] 陈碧华, 杨和连, 李亚灵, 等. 不同种植年限大棚菜田土壤水溶性盐分的变化特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 241-245.
CHEN B H, YANG H L, LI Y L, et al. Variation characteristics of soil water-soluble salts of large plastic house vegetable field for different cultivating years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 241-245.

[31] 梁芳源. 生物炭与木醋液对盐碱土盐离子吸附淋溶及迁移的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
LIANG F Y. Effects of biochar and wood vinegar on adsorption, leaching and migration of salt ions in saline-alkali soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.

[32] 王响玲, 夏浩, 李宇轩, 等. 施用生物炭对 2 种典型土壤养分有效性及肥力特征的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 158-167.
WANG X L, XIA H, LI Y X, et al. Effects of biochar application on nutrient availability and fertility characteristics of two typical soils[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(5): 158-167.

[33] SADEGH-ZADEH F, PARICHEHREH M, JALILI B, et al. Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(10): 3262-3271.

[34] 叶静, 陈影, 屈爽, 等. 不同微生物菌肥对滨海盐渍土土壤质量及玉米产量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4279-4292.
YE J, CHEN Y, QU S, et al. Effects of different microbial fertilizers on soil quality and maize yield in coastal saline soil[J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4279-4292.

[35] LUO L, WANG J X, LV J T, et al. Carbon sequestration strategies in soil using biochar: advances, challenges, and opportunities[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(31): 11357-11372.

[36] 李翠兰, 李志洪, 张晋京, 等. 不同施肥处理对玉米根际土壤磷素利用的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 681-684.
LI C L, LI Z H, ZHANG J J, et al. Effect of different fertilization treatments on phosphorus utilization in maize rhizosphere soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 681-684.

[37] XU X Y, ZHAO Y H, SIMA J K, et al. Indispensable role of biochar-inherent mineral constituents in its environmental applications: a review[J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 887-899.

[38] ZHENG H, WANG Z Y, DENG X, et al. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil[J]. Geoderma, 2013, 206: 32-39.

(下转第 77 页)

[25] MCPHARLIN I R，AYLMORE P M，JEFFERY R C. Nitrogen requirements of lettuce under sprinkler irrigation and trickle fertigation on a spearwood sand[J]. Journal of Plant Nutrition，1995，18(2)：219-241.

[26] ZHU J H，LI X L，CHRISTIE P，et al. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2005，111(1/2/3/4)：70-80.

[27] HONG C，LU S G. Does biochar affect the availability and chemical fractionation of phosphate in soils? [J]. Environmental Science and Pollution Research，2018，25：8725-8734.

[28] QIN H L，ZHANG Z X，LU J，et al. Change from paddy rice to vegetable growing changes nitrogen-cycling microbial communities and their variation with depth in the soil[J]. European Journal of Soil Science，2016，67(5)：650-658.

[29] 陈检锋，陈华，付利波，等. 免耕覆盖下不同氮磷钾配比对旱地小麦产量效益和养分利用的影响[J]. 农学学报，2020，10(2)：50-55.
CHEN J F，CHEN H，FU L B，et al. Effects of various NPK combinations on yield，effects of various NPK combinations on yield，economic benefit and nutrition utilization of wheat with mulching and no-tillage[J]. Journal of Agriculture，2020，10(2)：50-55.

[30] LIANG F，LI B，VOGT R D，et al. Straw return exacerbates soil acidification in major Chinese croplands[J]. Resources，Conservation and Recycling，2023，198：107176.

[31] VAN BREEMEN N，MULDER J，DRISCOLL C T. Acidification and alkalinization of soils[J]. Plant and Soil，1983，75：283-308.

[32] XU L Y，WANG M Y，SHI X Z，et al. Effect of long-term organic fertilization on the soil pore characteristics of greenhouse vegetable fields converted from rice-wheat rotation fields[J]. Science of The Total Environment，2018，631：1243-1250.

[33] 鲁艳红，廖育林，聂军，等. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响[J]. 土壤学报，2016，53(1)：202-212.
LU Y H，LIAO Y L，NIE J，et al. Effect of long-term fertilization and lime application on soil acidity of reddish paddy soil [J]. Acta Pedologica Sinica，2016，53(1)：202-212.

[34] 范庆锋，张玉龙，陈重，等. 保护地土壤酸度特征及酸化机制研究[J]. 土壤学报，2009，46(3)：466-471.
FAN Q F，ZHANG Y L，CHEN C，et al. Acidity characteristics and acidification mechanism of soils in protected fields [J]. Acta Pedologica Sinica，2009，46(3)：466-471.

（责任编辑：屈李纯）

（上接第 68 页）

[39] 项剑，孙禧，王成，等. 生物炭对滨海盐碱土氮素转化和 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报，2023，34(11)：2969-2977.
XIANG J，SUN X，WANG C，et al. Effects of biochar application on nitrogen transformation and N_2O emission in a coastal saline-alkali soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2023，34(11)：2969-2977.

[40] LI J G，PU L J，HAN M F，et al. Soil salinization research in China：advances and prospects [J]. Journal of Geographical Sciences，2014，24(5)：943-960.

[41] DA SILVA ALVES L，CAITANO C E C，FERRARI S，et al. Application of spent sun mushroom substrate in substitution of synthetic fertilizers at maize topdressing[J]. Agronomy，2022，12(11)：2884.

[42] 张晗芝，黄云，刘钢，等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报，2010，19(11)：2713-2717.
ZHANG H Z，HUANG Y，LIU G，et al. Effects of biochar on corn growth，nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage[J]. Ecology and Environmental Sciences，2010，19(11)：2713-2717.

（责任编辑：李小平）