

化肥减量配施黄腐酸降低盐渍农田 NaCl 含量 提高氮磷养分有效性的协同效应

刘小媛^{1,2}, 杨劲松^{1*}, 姚荣江¹

(1 中国科学院南京土壤研究所/土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏南京 210008;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:【目的】土壤盐渍化以及肥料过量施用严重限制着黄河三角洲盐渍化地区农业的可持续发展。综合分析氮、磷肥优化减量及其与黄腐酸配施对盐渍农田土壤肥力、冬小麦产量以及养分吸收利用的影响, 可为该区盐渍农田化肥减施增效提供理论依据。【方法】以黄河三角洲中度盐土 [pH 7.73、电导率 (EC) 1.18 dS/m] 为研究对象进行室内盆栽试验, 试验设 5 个施肥水平, 分别为常规氮磷肥用量 (N100P100)、氮肥常规用量的 85% (N85P100)、氮肥常规用量的 70% (N70P100)、磷肥常规用量的 85% (P85N100)、磷肥常规用量的 70% (P70N100); 每个处理下又分为添加、不添加黄腐酸 (H) 两个处理, 并且以不施肥料和黄腐酸的处理为对照 (CK), 共 11 个处理。在冬小麦苗期和收获期, 分别采集 0—10 和 10—20 cm 土层土壤样品, 测定土壤有效磷、硝态氮、EC、pH 和盐分离子组成。在收获期, 测定冬小麦籽粒产量、全氮及全磷含量。【结果】化肥减量配施黄腐酸处理降低了冬小麦苗期和收获期 0—10 cm 土层硝态氮含量, 提高了收获期 10—20 cm 土层硝态氮含量。0—10 cm 土层土壤有效磷含量随着氮肥施用量的增加呈现降低的趋势。随着施氮量的增加, 土壤溶液 EC、Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻ 含量增加, 而 Mg²⁺ 含量减少。与 N100P100 相比, N85P100、N70P100、P85N100、P70N100 处理下的土壤 Na⁺ 含量分别降低了 29.74%、55.84%、28.62% 和 43.25%, Cl⁻ 含量分别降低了 37.68%、43.81%、26.11% 和 14.53%。与相同养分量处理相比, N100P100+H、N85P100+H、N70P100+H、P85N100+H、P70N100+H 处理下的 Na⁺ 含量分别下降了 64.63%、31.20%、5.14%、32.66%、30.59%, Cl⁻ 含量分别下降了 66.74%、55.07%、35.93%、53.56%、70.44%。处理 N85P100、N70P100、P85N100、P70N100 的冬小麦产量与 N100P100 没有显著差异, N70P100+H 和 P85N100+H 的冬小麦产量显著高于 N70P100 和 P85N100。氮、磷素吸收效率均随着氮肥施用量的增加而减少, 与 N100P100 相比, N85P100、N70P100 处理下的氮素吸收效率分别提高 11.22%、29.37%。与单施化肥处理相比, 化肥减量配施黄腐酸处理均能够提高冬小麦产量、氮、磷素吸收效率和偏生产力。通过相关分析发现, 土壤盐分是降低作物产量的直接原因, 其中, Na⁺、Cl⁻ 和 EC 与氮素吸收效率、偏生产力及磷素吸收效率、偏生产力呈显著负相关。【结论】黄河三角洲盐渍农田的主要盐分是 NaCl, Na⁺、Cl⁻ 含量决定着 EC 值, 与氮素吸收效率、偏生产力及磷素吸收效率、偏生产力呈显著负相关。化肥减量可显著减少土壤盐分含量, 配施黄腐酸能够显著降低土壤中的 Na⁺ 和 Cl⁻ 含量, 缓解盐碱胁迫对作物的影响, 提高冬小麦产量、氮、磷素吸收效率和偏生产力。减施氮肥能够提高冬小麦苗期和收获期 0—10 cm 土层的有效磷含量, 减施氮肥 30% 时的土壤有效磷含量高于减施氮 15% 和常规施氮量。

关键词: 肥料减施; 黄腐酸; 养分吸收效率; 产量; 盐渍农田

Synergistic effects of fertilizer reduction and fulvic acid application on decreasing NaCl content and N, P availability of salinized soil

LIU Xiao-yuan^{1,2}, YANG Jin-song^{1*}, YAO Rong-jiang¹

(1 Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences/State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

收稿日期: 2021-01-19 接受日期: 2021-03-11

基金项目: 国家自然科学基金委员会—山东联合基金重点项目 (U1806215, U1906221); 国家自然科学基金面上项目 (41977015); 国家重点研发计划项目 (2019YFD1002702)。

联系方式: 刘小媛 E-mail: liuxiaoyuan@issas.ac.cn; * 通信作者 杨劲松 E-mail: jsyang@issas.ac.cn

Abstract: [Objectives] Salinization restricts the sustainable development of agriculture in the Yellow River Delta. The combined effects of fulvic acid and chemical fertilizer reduction on soil desalination and winter wheat yield were studied. **[Methods]** A pot experiment was conducted in a moderately saline-alkaline soil (pH 7.73, EC 1.18 dS/m). The treatments were composed of conventional N and P fertilizer rate (N100P100), and reduced N or P rate as N85P100, N70P100, P85N100, and P70N100, and the treatments combined with addition of 10 kg/hm² of fulvic acid (H). At the seedling and harvest stages of winter wheat, soil samples at 0–10 cm and 10–20 cm depths were collected to determine the contents of available P, NO₃⁻-N, EC, pH, and ion composition. The wheat yield, N and P contents were determined at harvest. **[Results]** Chemical fertilizer reduction combined with fulvic acid treatments decreased 0–10 cm soil NO₃⁻-N content at seedling and harvest stages, but increased 10–20 cm soil NO₃⁻-N content at harvest stage. Soil available P decreased with increasing nitrogen application rate at 0–10 cm soil depth. With increased rate of N application, soil salt, Na⁺, Ca²⁺, and Cl⁻ contents increased, while Mg²⁺ content decreased. Compared with N100P100, N85P100, N70P100, P85N100 and P70N100 treatments decreased soil Na⁺ contents by 29.74%, 55.84%, 28.62% and 43.25%, decreased Cl⁻ content by 37.68%, 43.81%, 26.11% and 14.53%. Compared with the same chemical N and P rate treatments, N100P100+H, N85P100+H, N70P100+H, P85N100+H and P70N100+H decreased Na⁺ contents by 64.63%, 31.20%, 5.14%, 32.66%, and 30.59%, decreased Cl⁻ contents by 66.74%, 55.07%, 35.93%, 53.56%, and 70.44%. The yield increase in N70P100+H, P85N100+H were significantly higher than those in N70P100, P85N100. Compared with N100P100, the N uptake efficiency of N85P100 and N70P100 increased by 11.22% and 29.37%, chemical fertilizer reduction with fulvic acid treatments improved uptake efficiency and partial factor productivity of N and P. Through correlation analysis, soil salinity was the direct reason of yield decrease. Na⁺, Cl⁻ and EC were significantly and negatively correlated with uptake efficiency and partial factor productivity of N and P. **[Conclusions]** The main salt is NaCl in moderately salinized soil of Yellow River Delta. The Na⁺, Cl⁻ contents determine the EC value of soil, and negatively correlated with nutrient efficiency and partial productivity. Reducing N and P application rate could significantly decrease soil salt content, and increase the available P content in 0–10 cm soil. Their combination with application of fulvic acid further decrease the Na⁺ and Cl⁻ contents, alleviate salt stress to crop, increase N and P uptake by winter wheat. Reducing 30% of nitrogen leads to higher soil available P and lower soil EC value than normal and 15% less of nitrogen rate.

Key words: fertilizer reduction; fulvic acid; nutrient uptake efficiency; yield; saline-alkaline farmland

土壤盐渍化是制约农业可持续发展的全球性生态环境问题之一^[1], 全球大约有 3% 的土地正在遭受土壤盐渍化的威胁, 且仍以每年 200 万 hm² 的速度增长^[2-3]。中国盐碱土总面积高达 9900 万 hm², 盐碱耕地面积超过 920.9 万 hm², 占我国耕地总面积的 6.62%^[4-5]。滨海盐碱土是我国盐碱土的主要类型之一, 主要分布于河口三角洲以及沿海滩涂, 占我国盐碱土总面积的 40%^[6]。黄河三角洲位于山东省东北部, 地处太平洋与黄淮海平原交汇处, 是我国滨海盐碱地的典型代表之一。该区盐碱土总面积高达 44.29 × 10⁴ hm², 占该区耕地总面积的 50%, 并且每年仍有 1.33 × 10³~2.00 × 10³ hm² 的新生盐碱荒地生成^[7-9]。土壤盐碱化严重威胁着当地农业的可持续发展, 随着黄河三角洲地区的开发建设上升为国家战

略, 解决当地土壤盐碱化问题成为黄河三角洲生态经济发展的首要问题。

由于黄河三角洲地区受海水倒灌的影响, 土壤盐分离子组成以 Cl⁻、Na⁺ 为主, 不利于土壤颗粒絮凝、团聚体形成和氮磷养分的保持, 导致土壤肥力水平低下, 限制了该区农业生产力的提升^[10]。为了提高该区的作物产量, 化肥施用量日益增加, 远超作物的实际需求。盲目过量施肥不仅增加了农业的投入成本, 降低了肥料利用率, 而且还会引起土壤次生盐渍化、土壤板结等问题, 抑制作物的生长发育, 导致作物减产, 并且破坏该区的生态环境^[11-12]。因此, 为了提高作物养分利用率, 降低氮磷养分对环境的影响, 国内外研究学者提出了“4R 养分管理技术”, 即合理的养分施用量、施用位置、施用时

间和肥料品种^[13-14]。其中, 明确作物的最佳养分投入量, 控制多余化肥的施用, 是实现农业减肥增效的第一步^[15]。氮素是作物生长发育必需的养分之一, 对提高作物产量发挥着重要的作用, 但是我国氮肥利用率仅为 30%~35%, 远低于世界氮肥利用率 40%~60%^[16-18]。已有研究表明, 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系氮素盈余量高达 227 kg/hm², 虽然氮肥施用量日趋增加, 但是产量却没有明显增加, 且带来了严重的环境问题^[19]。因此, 如何在盐碱耕地上, 实现减施氮肥的同时提高作物产量和氮肥利用率是当前我国亟待解决的关键科学问题。

磷素也是作物生长发育必不可少的营养元素, 是影响作物生产最重要的限制因子之一。为了追求高产, 磷肥施用量不断增加, 导致我国磷肥当季利用率仅为 7.3%~20.1%。盲目和过量施用磷肥会导致磷素在土壤中过量积累, 通过地表径流、淋失等排放途径, 导致水体的富营养化^[20-21]。合理的磷肥施用量不仅能够提高作物产量, 而且还能够提高其它养分(氮、钾)的利用率^[22]。赵伟等^[23]研究表明, 与常规施肥量相比, 连续两年减磷 70% 不仅没有显著影响设施番茄的产量和磷素的吸收量, 而且还能够减缓土壤中有效磷的累积, 改善了土壤环境。马琴等^[24]通过田间试验发现, 磷肥施用量由 120 kg/hm² 降低至 70~75 kg/hm² 仍能够满足玉米对磷素的需求量, 实现稳产高产, 提高磷肥偏生产力。郝中明等^[21]提出磷肥投入量在 60 kg/hm² 最为适宜, 既能够提高作物产量, 又能够实现减肥增效。由于磷肥施用量受土壤类型、气候条件、种植制度等因素的影响, 因此需要根据当地的实际情况, 因地制宜地科学施用磷肥, 才能够保证作物的高产稳产, 实现农业的可持续发展。

面对化肥在农业生产中投入量持续增加对农田土壤以及生态环境造成污染的严峻形势, 化肥配施技术已成为实现我国化肥施用总量“零增长”目标的重要举措。大量研究表明, 在肥料减量的基础上, 配施有机肥、绿肥、生物炭均能够改善土壤理化性质、提高作物产量^[25-27]。然而, 这些有机物料的缺点是, 它们不能及时地为作物提供可吸收、水溶性的营养物质^[28]。腐殖物质是动植物残骸在微生物以及一系列物理化学过程的作用下而形成的一类有机高分子聚合物, 是地球表面重要的有机碳库之一^[29]。黄腐酸是腐殖物质中分子量较小且活性较大的全水溶有机芳香族类物质, 含有多种官能团, 易被作物吸收利用^[30]。已有研究表明, 黄腐酸不仅能够改善土

壤结构、提高土壤肥力, 而且还能够促进作物生长、增强作物抗逆性、提高作物产量和品质^[31-32]。但是以往的研究多集中在黄腐酸施用量对土壤质量以及作物产量的影响, 缺乏在盐碱耕地上, 肥料减量的同时配施黄腐酸对土壤氮磷养分、作物养分吸收利用和增产效果的研究。

本研究以黄河三角洲盐渍土壤为研究对象, 通过室内盆栽试验, 探讨在肥料减量的条件下, 配施黄腐酸对盐渍农田土壤肥力、冬小麦产量以及养分有效性的影响, 以期为黄河三角洲盐渍农田肥料管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为取自山东省东营市广饶县山东省农业科学院试验基地 (118°37'11.78"E、37°18'7.96"N) 的 0—20 cm 耕层土壤, 将土壤风干、过筛(孔径 2 mm)、混合均匀后制备成室内试验土样。供试土壤 pH 为 7.73, 电导率(EC) 为 1.18 dS/m, 全盐含量为 3.30 g/kg, Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 含量分别为 2.08、0.02、0.78 和 0.54 cmol/kg, SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻ 含量分别为 1.28、3.01 和 0.19 cmol/kg, 有机质含量 6.49 g/kg, 全氮含量 0.92 g/kg, 全磷含量 0.70 g/kg, 有效磷含量 9.90 mg/kg。土壤质地为黏壤土, 其中黏粒、粉粒和砂粒相对含量分别是 27.08%、33.84% 和 39.08%。

氮肥和磷肥分别使用尿素 [CO(NH₂)₂, 99%, 国药] 和磷酸二氢钾 (KH₂PO₄, 99.5%, 国药)。供试黄腐酸 (N 含量 10.2 g/kg, P₂O₅ 含量 10.8 g/kg, K₂O 含量 105 g/kg, 有机质含量 977 g/kg) 由山西富里酸农业科技有限公司提供, 精选矿源腐殖酸中分子量最小的富里酸, 通过低温喷雾、分级断链、流化床中空加菌一体复合成型。供试小麦品种为“济南 17 号”。

1.2 试验设计

本研究于 2019 年 10 月至 2020 年 5 月在中国科学院南京土壤研究所温室进行, 采用盆栽试验方法, 以中度盐化土壤为研究对象。试验采用高为 31.0 cm、上口直径为 27.5 cm、底部直径为 22.0 cm 的塑料盆钵, 为了便于通气, 盆底设有 6 个圆孔。每盆的填土高度为 25 cm, 装土质量为 13.69 kg, 在播种前, 将黄腐酸、基肥与土壤混匀后装入盆钵中, 加水至田间持水率, 使肥料、黄腐酸平衡两天后, 疏松表土并播种, 每盆播种 40 粒。试验期

间,保持土壤含水率在田间持水率的 $60\% \pm 5\%$,作物生长期期间的管理均按照常规进行。

本研究共设置 11 个处理:1) 不施任何肥料和黄腐酸 (CK); 2) 常规氮磷肥用量 (N100P100); 3) 氮肥常规用量的 85% (N85P100); 4) 氮肥常规用量的 70% (N70P100); 5) 磷肥常规用量的 85% (P85N100); 6) 磷肥常规用量的 70% (P70N100); 7) 常规氮磷肥用量+黄腐酸 (N100P100+H); 8) 氮肥常规用量的 85%+黄腐酸 (N85P100+H); 9) 氮肥常规用量的 70%+黄腐酸 (N70P100+H); 10) 磷肥常规用量的 85%+黄腐酸 (P85N100+H); 11) 磷肥常规用量的 70%+黄腐酸 (P70N100+H)。盆栽试验的肥料施用量设置为田间常规氮磷肥施用量的 2 倍,田间常规氮、磷肥 (P_2O_5) 施用量分别为 280 和 143 kg/hm²,减氮、减磷处理为常规用量的百分数,添加黄腐酸处理黄腐酸的用量为 150 kg/hm²,每个处理 3 次重复,氮肥分别在播前和返青期按照 6:4 的比例施入土壤中,磷肥全量基施。

1.3 样品采集与测定

分别于苗期 (2019 年 11 月 18 日) 和收获期 (2020 年 5 月 7 日),在每盆小麦植株间选两点采集土样,采样深度为 0—10 和 10—20 cm。将样品混匀后,其中一部分土样用以测定土壤硝态氮含量,另一部分土样风干后测定土壤有效磷、EC、pH、盐分离子组成。冬小麦收获后,将小麦茎、叶和籽粒在 105℃ 下杀青 15 min,80℃ 烘干,称量干物质量。然后分别研磨过 0.15 mm (100 目) 筛,用于测定磷和氮含量。

土壤硝态氮采用紫外分光双波长法测定;有效磷含量采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;EC 和 pH 采用土水比 1:5 浸提,用 EC 计 (LE703,上海梅特勒-托利多仪器有限公司) 和 pH 计 (LE438,上海梅特勒-托利多仪器有限公司) 测定;土壤全盐含量采用残渣法测定;土壤 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 采用双指示剂-中和滴定法测定;土壤 Na^+ 、 K^+ 采用火焰光度法测定;土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法测定;土壤 Cl^- 采用 $AgNO_3$ 滴定法测定;土壤 SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法测定;作物样品采用 H_2SO_4 - H_2O_2 联合消煮,半微量凯氏定氮法测定氮素含量,钼锑抗比色法测定磷素含量。

1.4 计算公式及统计分析

作物收获后养分吸收效率、偏生产力的计算方法^[33-34]如下:

$$\begin{aligned} \text{养分吸收效率} &= (\text{作物干物质量} \times \text{养分含量}) / \text{施肥量}; \\ \text{养分偏生产力} &= \text{籽粒产量} / \text{施肥量} \end{aligned}$$

采用 Microsoft Excel 2016 对试验数据进行整理和分析,采用 OriginPro 2016 进行数据作图,采用 SAS 进行统计分析,并采用单因素方差分析和 Duncan 多重比较法分析不同处理间的差异显著性 ($P < 0.05$ 差异显著)。

2 结果与分析

2.1 化肥减量配施黄腐酸对盐渍土壤硝态氮含量的影响

由表 1 可知,与 N100P100 处理相比,N85P100、N70P100、P85N100 和 P70N100 处理均降低了冬小麦苗期 (2019 年 11 月 18 日) 和收获期 (2020 年 5 月 7 日) 0—10 cm 土层硝态氮含量。除 P85N100+H 处理外,其余 4 个化肥配施黄腐酸处理均降低了冬小麦苗期 0—10 cm 土层硝态氮含量。在 0—10 cm 土层,在同一施肥量条件下,N100P100+H 处理下冬小麦苗期和收获期土壤硝态氮含量分别显著降低了 18.02% 和 40.74%,N85P100+H 处理下冬小麦收获期土壤硝态氮含量显著降低了 36.92%,P85N100+H 处理下冬小麦收获期土壤硝态氮含量显著降低了 24.70%,P70N100+H 处理下冬小麦收获期土壤硝态氮含量显著降低了 44.29%,而冬小麦收获期 N70P100+H 的土壤硝态氮含量没有显著下降。

对于 10—20 cm 土层而言,冬小麦苗期土壤硝态氮含量在不添加黄腐酸的 4 个处理 (N85P100、N70P100、P85N100、P70N100) 之间差异均未达到显著水平;在减氮 15% 和 30% 的条件下,黄腐酸的施用降低了冬小麦苗期的土壤硝态氮含量,而在常规施氮量、减磷 15% 和减磷 30% 的条件下,黄腐酸的施用提高了冬小麦苗期的土壤硝态氮含量。在冬小麦收获期,黄腐酸的施用均提高了土壤硝态氮含量,尤其是在磷肥减施条件下,施用黄腐酸显著增加了土壤硝态氮含量;氮肥减量配施黄腐酸处理土壤硝态氮含量较 N100P100 显著增加了 37.73%~109.62%,而磷肥减量配施黄腐酸处理土壤硝态氮含量较 N100P100 显著增加了 123.31%~192.28%。

2.2 化肥减量配施黄腐酸对盐渍土壤有效磷含量的影响

由表 2 可知,从冬小麦苗期至收获期,土壤有效磷含量呈现降低的趋势。对于 0—10 cm 土层而言,冬小麦苗期土壤有效磷含量介于 12.84 和 34.57

表 1 不同处理对 0—10 和 10—20 cm 土层土壤硝态氮含量 (mg/kg) 的影响

Table 1 Effects of different treatments on soil nitrate content at 0—10 cm and 10—20 cm soil depths

处理 Treatment	0—10 cm		10—20 cm	
	苗期 Seedling stage	收获期 Harvesting stage	苗期 Seedling stage	收获期 Harvesting stage
N100P100	112.41 a	105.22 a	90.94 c	59.80 g
N100P100+H	92.15 b	62.36 cd	115.26 abc	128.30 c
N85P100	91.30 b	68.20 c	117.36 abc	112.62 de
N85P100+H	82.02 bc	43.02 e	97.01 c	125.34 cd
N70P100	91.25 b	61.89 cd	114.37 abc	80.65 f
N70P100+H	79.52 c	51.77 de	105.41 bc	82.36 f
P85N100	74.30 c	84.86 b	118.42 abc	106.02 e
P85N100+H	77.64 c	63.90 c	138.89 a	133.53 c
P70N100	75.24 c	84.10 b	119.57 abc	148.54 b
P70N100+H	74.83 c	46.85 e	134.56 ab	174.77 a
CK	26.86 d	3.22 f	30.51 d	13.88 h

注 (Note): 同列数据后不同字母表示不同施肥处理间差异显著 Values followed by different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

表 2 不同处理对 0—10 和 10—20 cm 土层土壤有效磷含量 (mg/kg) 的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil Olsen-P content at 0—10 cm and 10—20 cm soil depths

处理 Treatment	0—10 cm		10—20 cm	
	苗期 Seedling stage	收获期 Harvesting stage	苗期 Seedling stage	收获期 Harvesting stage
N100P100	23.24 d	14.51 bc	27.62 a	14.07 c
N100P100+H	26.30 c	13.98 bc	24.80 ab	18.21 b
N85P100	26.65 bc	15.96 ab	26.30 a	17.85 b
N85P100+H	26.19 c	15.22 b	27.44 a	18.38 b
N70P100	34.57 a	17.59 a	24.63 ab	22.56 a
N70P100+H	29.11 b	14.25 bc	26.91 a	18.38 b
P85N100	24.67 cd	12.93 cd	24.63 ab	13.72 c
P85N100+H	20.32 e	12.53 cde	25.07 ab	14.51 c
P70N100	25.33 cd	11.61 de	21.37 b	12.14 c
P70N100+H	24.28 cd	10.64 e	21.57 b	12.21 c
CK	12.84 f	6.07 f	12.14 c	7.26 d

注 (Note): 同列数据后不同字母表示不同施肥处理间差异显著 Values followed by different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

mg/kg 之间, 收获期土壤有效磷含量为 6.07~17.59 mg/kg。与常规施氮量相比, 减施氮肥能够提高冬小麦苗期和收获期土壤有效磷含量, 且土壤有效磷含量随着施氮量的降低而增加。在冬小麦苗期, N85P100 和 N70P100 处理下的土壤有效磷含量分别比 N100P100 增加了 14.68% 和 48.75%。而在冬小麦收获期, 与 N100P100 处理相比, N85P100 和

N70P100 处理下的土壤有效磷含量分别增加了 10.01% 和 21.21%, P85N100 和 P70N100 处理分别降低了 10.91% 和 20.00%。在常规施肥量条件下, 黄腐酸的添加显著提高了冬小麦苗期土壤有效磷含量, N100P100+H 处理较 N100P100 处理土壤有效磷含量增加了 13.17%。在减氮或者减磷条件下, 黄腐酸的添加均降低了土壤有效磷含量。

对于 10—20 cm 土层而言, 冬小麦苗期土壤有效磷含量介于 12.14 和 27.62 mg/kg 之间, 收获期土壤有效磷含量为 7.26~22.56 mg/kg。在冬小麦苗期, 土壤有效磷含量表现为: N100P100 > N85P100 > N70P100/P85N100 > P70N100, 而在冬小麦收获期, 表现为: N70P100 > N85P100 > N100P100 > P85N100 > P70N100。在减氮或减磷的条件下, 添加黄腐酸均提高了冬小麦苗期土壤有效磷含量, 但是在同一肥料施用量下, 土壤有效磷含量在添加与不添加黄腐酸处理之间差异均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。与 N100P100 处理相比, N100P100+H 处理显著提高了冬小麦收获期土壤有效磷含量, 增加了 29.38%。

2.3 化肥减量配施黄腐酸对土壤盐碱障碍因子的影响

由图 1a 可以看出, 施氮、施磷量均影响着土壤的 EC 值, N85P100 与 N70P100 处理下的 EC 值较 N100P100 分别降低了 30.58% 和 35.66%, 而 N85P100 与 N70P100 间差异不显著 ($P > 0.05$); P85N100 与 P70N100 处理下的 EC 值较 N100P100 分别降低了 22.70% 和 35.81%。在同一施肥量条件下, 配施黄腐酸相比单施化肥显著降低土壤 EC 值 ($P < 0.05$), N100P100+H、N85P100+H、N70P100+H 处理的下降幅度分别为 57.72%、47.96%、34.03%, P85N100+H、P70N100+H 处理分别显著降低了 38.38%、37.19%。

由图 1b 可以看出, 该研究区的土壤盐分离子以 Na^+ 和 Cl^- 含量最高, Na^+ 含量和 Cl^- 含量分别占土壤盐分离子总量的 20.63%~31.72%、25.01%~47.62%。

随着氮肥施用量的减少, 土壤中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 含量呈现减少的趋势, 而 Mg^{2+} 含量呈现增加的趋势。N85P100、N70P100、P85N100、P70N100 处理下的土壤 Na^+ 含量较 N100P100 处理分别降低了 29.74%、55.84%、28.62% 和 43.25%。而 N85P100、N70P100、P85N100、P70N100 处理下的土壤 Cl^- 含量较 N100P100 处理分别降低了 37.68%、43.81%、26.11% 和 14.53%。与相同养分量处理相比, N100P100+H 处理的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量分别下降了 64.63%、49.86%、13.58%、22.84%、66.74%; N85P100+H、N70P100+H、P85N100+H、P70N100+H 处理下的 Na^+ 含量分别下降了 31.20%、5.14%、32.66%、30.59%。而 N85P100+H、N70P100+H、P85N100+H、P70N100+H 处理下的 Cl^- 含量分别下降了 55.07%、35.93%、53.56%、70.44%。

2.4 化肥减量配施黄腐酸对冬小麦产量及氮、磷养分吸收利用效率的影响

由图 2 可知, 与 CK 相比, 施肥处理均提高了冬小麦产量, 增产范围介于 283.24 与 981.37 kg/hm² 之间, 增产率为 4.20%~14.56%。N85P100、N70P100、P85N100、P70N100 的冬小麦产量分别比 N100P100 处理降低 1.82%、3.57%、4.68%、5.81%, 减产效果均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。化肥减量配施黄腐酸处理的冬小麦产量均比相应的单施化肥处理高, 其中 N70P100+H、P85N100+H 的增产幅度, 依次为 7.39%、8.10%, 均达到显著水平。

由表 3 可知, 不同施氮处理小麦秸秆氮吸收量差异

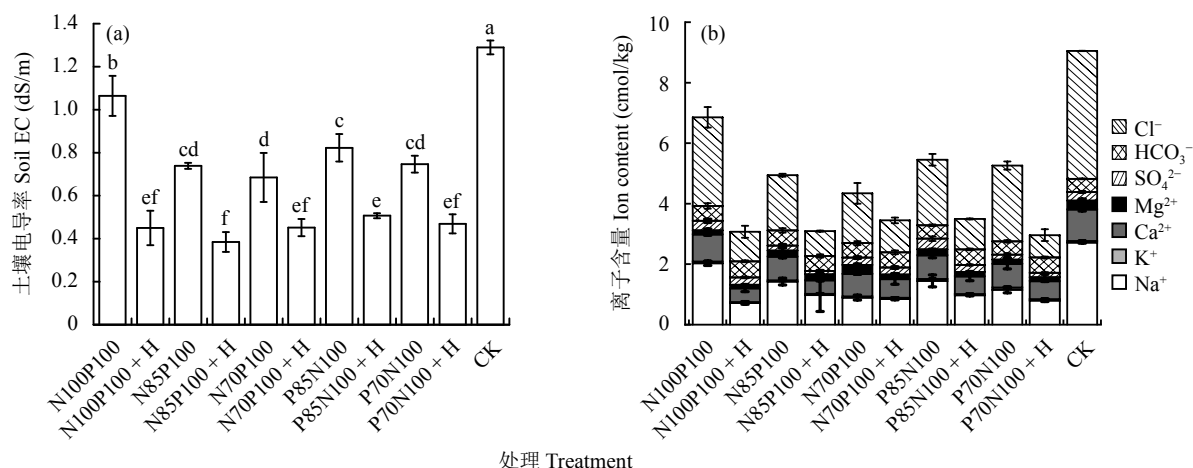


图 1 不同处理对冬小麦收获期 0—10 cm 土壤电导率 (a) 和土壤盐分离子含量 (b) 的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil EC (a) and ion content (b) at 0—10 cm soil depth at harvest stage

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)]

Different small letters above the bars indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).]

不显著, 而籽粒氮吸收量差异显著 ($P<0.05$)。N85P100、N70P100 处理籽粒氮吸收量较 N100P100 分别降低了 6.28%、10.79%。秸秆氮吸收量和籽粒氮吸收量均随着施磷量的降低而降低, P85N100、P70N100 处理的秸秆氮吸收量较 N100P100 分别降低了 19.47%、26.28%, 籽粒氮吸收量分别降低了

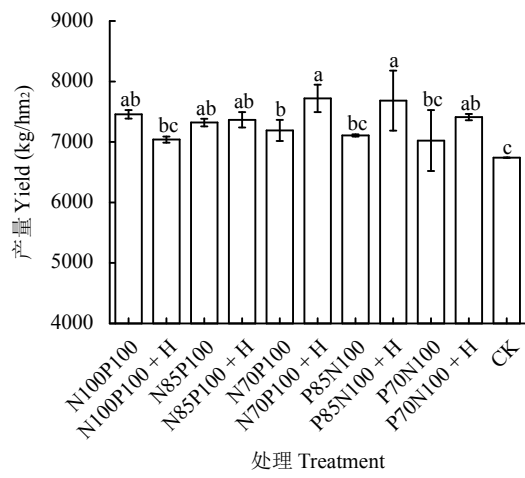


图 2 不同处理对冬小麦产量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on winter wheat yield

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters above the bars indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$).]

1.06%、9.82%。不同处理下籽粒的磷吸收量表现为: N70P100>N85P100>N100P100>P70N100>P85N100。降低氮肥施用量提高了氮素吸收效率、氮素偏生产力和磷素吸收效率, 对磷素偏生产力的影响较小。与 N100P100 处理相比, P85N100、P70N100 处理下氮素吸收效率分别降低了 7.24%、15.35%, 而磷素吸收效率分别增加了 21.92%、44.75%。在同一施肥量下, 除 N100P100+H 处理籽粒氮吸收量外, 化肥配施黄腐酸进一步提高了籽粒的氮、磷吸收量, 提高了氮、磷素吸收效率和偏生产力。与相同养分量处理相比, N85P100+H 处理下氮素吸收效率、磷素吸收效率分别提高了 7.06% 和 12.28%, N70P100+H 处理下氮素吸收效率、磷素吸收效率分别提高了 9.09% 和 11.86, P85N100+H 处理下氮素吸收效率、磷素吸收效率分别提高了 7.04% 和 6.35%, P70N100+H 处理下氮素吸收效率、磷素吸收效率分别提高了 7.69% 和 2.67%。

2.5 相关分析

冬小麦收获期 0—10 cm 土壤 EC 值、盐分离子组成, 0—10 和 10—20 cm 土壤硝态氮、有效磷含量与氮、磷吸收效率、偏生产力、产量之间的关系如图 3 所示。由图 3 可知, 土壤 EC 与 Na^+ 、 Cl^- 和

表 3 不同处理对冬小麦秸秆和籽粒的氮、磷吸收量及氮磷吸收效率和偏生产力的影响

Table 3 Effects of different treatments on nitrogen, phosphorus uptake of winter wheat straw and grain, absorption efficiency and partial factor productivity

处理 Treatment	氮吸收量 (kg/hm ²) N content		磷吸收量 (kg/hm ²) P uptake		吸收效率 (kg/kg) Uptake efficiency		偏生产力 (kg/kg) Partial factor productivity	
	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	N	P	N	P
N100P100	144.35 a	285.62 ab	10.00 e	22.77 cd	0.77 e	0.52 e	13.32 d	118.36 ef
N100P100+H	139.30 a	274.42 bc	13.12 cd	23.99 bc	0.74 ef	0.59 d	12.57 e	111.74 f
N85P100	138.81 a	267.67 cd	12.11 d	23.59 bc	0.85 d	0.57 de	15.38 c	116.20 ef
N85P100+H	140.70 a	292.28 a	15.06 a	25.48 ab	0.91 c	0.64 b	15.47 c	116.91 ef
N70P100	134.59 ab	254.79 d	12.47 cd	24.75 abc	0.99 b	0.59 cd	18.34 b	114.13 ef
N70P100+H	135.50 a	287.75 ab	15.05 a	26.57 a	1.08 a	0.66 b	19.70 a	122.56 e
P85N100	116.25 bc	282.59 abc	15.56 a	18.40 f	0.71 fg	0.63 bc	12.69 e	132.73 d
P85N100+H	127.57 ab	295.58 a	14.60 ab	21.48 de	0.76 e	0.67 b	13.72 d	143.48 c
P70N100	106.41 c	257.56 d	13.64 bc	19.56 ef	0.65 h	0.75 a	12.54 e	159.25 b
P70N100+H	101.57 c	288.24 ab	13.20 cd	20.97 de	0.70 g	0.77 a	13.23 de	168.04 a
CK	28.26 d	211.12 e	7.25 f	18.45 f				

注 (Note): 同列数据后不同字母表示不同施肥处理间差异显著 Values followed by different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$).).

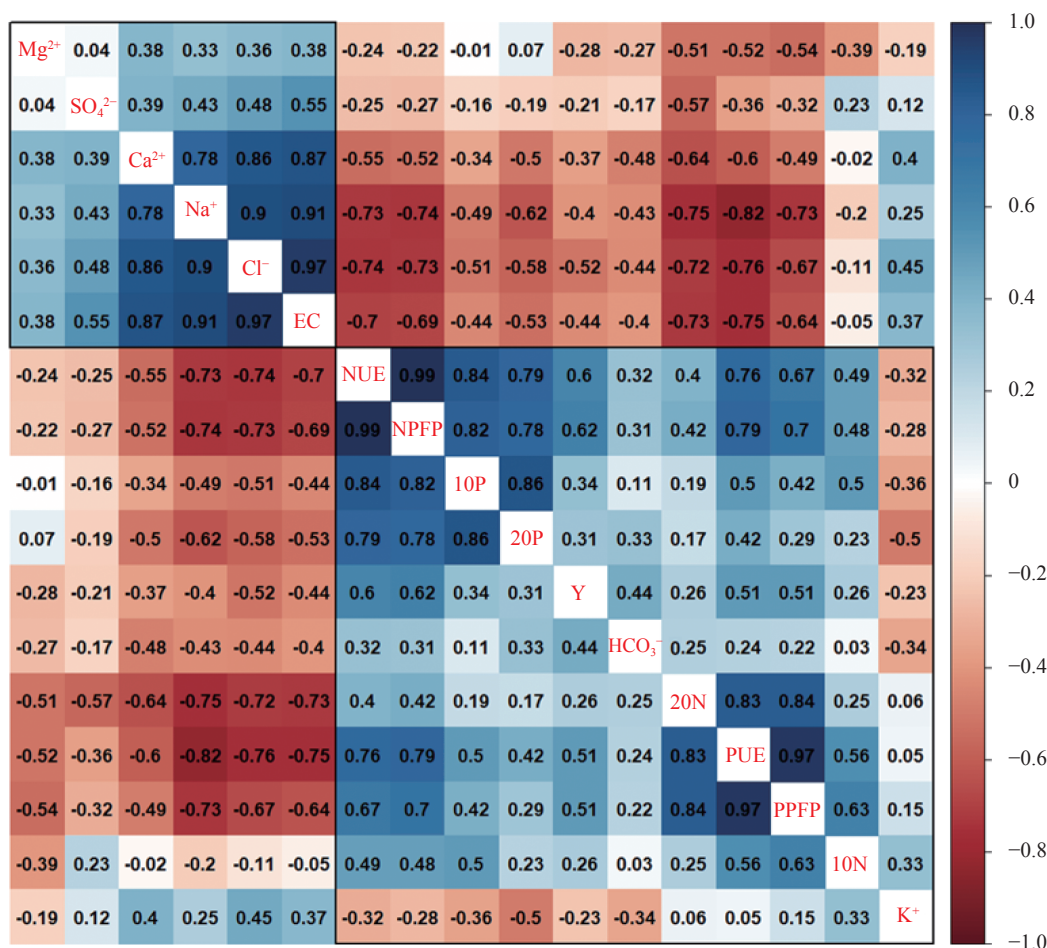
图3 产量、养分吸收效率与土壤理化性状的相关性分析(r)

Fig. 3 Correlation of grain yield and nutrient uptake with soil physiochemical properties

[注 (Note): NPFP—氮肥偏生产力 Partial factor productivity of N fertilizer; PPFP—磷肥偏生产力 Partial factor productivity of P fertilizer; 10P—土壤有效磷含量 (0—10 cm 土层) Soil available P content at 0—10 cm layer; 20P—土壤有效磷含量 (10—20 cm 土层) Soil available P content at 10—20 cm layer; 10N—土壤硝态氮含量 (0—10 cm) Soil nitrate content at 0—10 cm layer; 20N—土壤硝态氮含量 (10—20 cm 土层) Soil nitrate content at 10—20 cm layer; Y—冬小麦产量 Winter wheat yield; NUE—氮素吸收效率 N uptake efficiency; PUE—磷素吸收效率 P uptake efficiency; EC—电导率 (0—10 cm 土层) Electrical conductivity at 0—10 cm soil layer.]

Ca²⁺含量均呈极显著正相关 ($r > 0.85$), 其中与 Na⁺和 Cl⁻含量的相关系数均大于 0.90, 表明该地区土壤盐分主要由 NaCl 构成。作物产量与氮素吸收效率、偏生产力均呈较显著正相关 ($r > 0.60$)。0—10 和 10—20 cm 土层有效磷含量与作物产量之间均未达到显著相关水平, 而均与氮素吸收效率、偏生产力呈显著正相关 ($r > 0.75$)。10—20 cm 土层硝态氮含量与磷素吸收效率、偏生产力呈显著正相关 ($r = 0.80$)。相关分析的结果表明, 土壤盐分是降低作物产量的直接原因, 其中, Na⁺、Cl⁻和 EC 与氮素吸收效率、偏生产力及磷素吸收效率、偏生产力呈显著负相关 ($r < -0.60$)。此外, Na⁺、Cl⁻和 EC 与 10—20 cm 土层有效磷含量以及 10—20 cm 土层硝态氮含量均呈负相关。

3 讨论

在遭受盐碱化威胁的地区, 土壤中的可溶性盐能够改变氮磷养分的迁移转化过程, 进而影响作物产量以及养分有效性。已有研究表明, 过量施用化学肥料会导致土壤次生盐渍化, 严重危害农作物的生长发育, 降低农作物产量, 并且会对当地的生态环境产生不利影响^[5]。因而, 合理的肥料管理措施对保障盐碱耕地农业可持续发展和生态环境安全至关重要。

氮素是作物生长发育最主要的营养元素之一, 优化氮肥管理措施对于提高作物产量、改善作物品质、保护生态环境起着至关重要的作用。已有研究表明, 通过确定最佳氮肥施用量和控制过量氮肥的

投入来提高农业的可持续性已成为普遍接受的策略^[35]。本研究发现, 在冬小麦苗期和收获期, 0—10 cm 土层硝态氮含量均随施氮水平的降低而降低 (表 1)。这表明, 肥料过量施用会提高盐碱土壤硝态氮的淋失风险, 给农业生态环境带来潜在威胁。产生这种现象的原因可能是, 土壤硝态氮是土壤矿质态氮的主要组成部分, 土壤剖面硝态氮的残留率与氮肥施用量成正比^[36-37]。在冬小麦苗期, 0—10 cm 土层有效磷含量随施氮水平的降低而增加, 而在冬小麦收获期, 10—20 cm 土层的有效磷含量随施氮水平的降低而增加 (表 2)。这表明, 在盐渍农田过量施用氮肥会显著降低土壤磷的有效性^[38]。这可能与盐渍土壤中交换性 Ca^{2+} 含量较高有关, 当氮肥施用量较大时, 产生的 NH_4^+ 较多, NH_4^+ 能够促进土壤中交换性 Ca^{2+} 解吸, 从而增加磷的沉淀, 进而影响盐渍土壤磷的有效性。

已有研究表明, 较常规施氮量减少 20%~30% 时, 作物产量未出现显著下降^[39], 这与我们的研究结果一致。本研究发现, 处理 N85P100、N70P100 的冬小麦产量分别比 N100P100 降低 1.82%、3.57%, 减产效果均未达到显著差异水平 ($P > 0.05$)。这说明, 对于黄河三角洲盐渍农田, 适量地减少氮肥施用量是可行的。与常规施氮量相比, 氮肥减量配施黄腐酸均能够提高冬小麦产量、籽粒氮吸收量、籽粒磷吸收量、氮、磷素吸收效率和偏生产力 (图 2 和表 3)。这与李军等^[40]、姚媛媛等^[41]和 Liu 等^[42]的研究结果一致, 他们认为腐殖酸类物质与无机氮肥配施, 能够改善土壤的理化性质, 提高作物产量和养分利用率。已有研究表明, 黄腐酸主要通过以下几个机理来影响氮素有效性: 1) 黄腐酸能够和尿素络合反应形成腐脲, 从而具有抑制脲酶的作用, 可降低尿素的水解速率, 延长尿素的肥效期; 2) 黄腐酸含有羟基、羧基等活性基团, 具有较强的离子交换吸附能力, 能够显著减少氨挥发, 增强氨稳定。

已有研究表明, 磷肥投入量与土壤有效磷含量成线性正相关^[43], 但适宜我国冬小麦生长所需土壤 Olsen-P 临界水平为 12.5~19.0 mg/kg, 而当 Olsen-P 含量超过 40.0 mg/kg 时就会产生淋溶风险^[44]。本研究发现在冬小麦苗期, N100P100、P85N100、P70N100 处理下 0—10 cm 土层有效磷含量分别为 23.24、24.67、25.33 mg/kg, 10—20 cm 土层有效磷含量分别为 27.62、24.63、21.37 mg/kg。而在冬小麦收获期, N100P100、P85N100、P70N100 处理 10—20 cm 土层的土壤有效磷含量未表现出显著性差

异。这表明, 磷肥减施后土壤有效磷含量能够满足作物的生长发育。此外, 处理 P85N100、P70N100 的冬小麦产量分别比 N100P100 降低 4.68%、5.81%, 减产效果均未达到显著差异水平 ($P > 0.05$)。与处理 N100P100 相比, P85N100、P70N100 处理下氮素吸收效率分别降低了 7.24%、15.35%, 而磷素吸收效率分别增加了 21.92%、44.75%。这表明, 增施磷肥能够增加氮素吸收效率, 而降低磷素吸收效率。产生这种现象的原因可能是, 增施磷肥能够极大地促进作物根系的生长, 提高根系干物质量, 从而提高作物根系吸收和利用氮素能力, 但是由于磷肥施入土壤后, 很容易被吸附、固定、沉淀, 从而过量施磷降低了磷素的吸收利用率。

本研究发现, 在常规施肥量条件下, 添加黄腐酸降低了冬小麦产量、氮素吸收效率、氮素偏生产力和磷素偏生产力, 产生这种现象的原因可能是当肥料施用量较高时, 施用黄腐酸促进了作物前期的营养生长, 而且过高的 NH_4^+ 与黄腐酸能够生成黄腐酸铵, 降低了作物生长发育关键营养需求期对养分的供应, 对生殖生长不利。与单施化肥相比, 磷肥减量配施黄腐酸提高了冬小麦产量。这与张丽丽等^[45]的研究结果一致, 他们认为在碱性土壤上, 黄腐酸施用能够使磷减施处理下的番茄产量达到全量施磷处理下的水平。产生这种现象的原因可能是黄腐酸能够促进土壤中矿物质的分解, 改善土壤质量, 增加土壤肥力, 促进作物根系活力, 提高作物对氮磷养分的转运、吸收和利用, 增加作物的抗逆能力, 进而提高作物产量。同时, 与单施化肥相比, 磷肥减量配施黄腐酸提高了磷素吸收效率和偏生产力, 已有研究表明黄腐酸主要通过以下几个机理来影响磷素的有效性: 1) 黄腐酸中的阴离子能够与磷酸根离子竞争吸附点位, 减少土壤对磷的吸附, 同时能够与磷酸根离子形成可溶性的螯合物, 减少磷在土壤中的固定, 提高磷的有效性; 2) 盐碱土壤中富含较多的阳离子 (例如 Ca^{2+}), 黄腐酸与土壤中阳离子亲和性较强, 能够发生络合反应、溶解反应, 促进了盐碱土壤中难溶性磷的溶解, 同时黄腐酸与阳离子能够生成 HA-金属-磷酸盐络合物, 抑制土壤中磷的固定, 提高磷的有效性^[46]。

本研究还发现, 土壤盐分含量随着施氮量的降低而降低, 这与曾文治等^[12]、马韬等^[5]研究结果一致。随着氮肥施用量的降低, 土壤中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 含量均呈现降低的趋势, 而 Mg^{2+} 含量呈现增加的趋势。产生这种现象的原因可能是施肥产生的 NH_4^+ 和

NO_3^- 影响了土壤离子平衡, 导致盐分离子向下淋溶, 随着施肥量的增加产生的阴阳离子增加, 与土壤胶体中的阳离子发生交换, 使得高氮肥用量处理下的土壤可溶性 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度高于低氮肥用量处理。而当肥料施用量增加, 由硝化作用产生的 NO_3^- 升高, NO_3^- 的淋溶取代了部分 Cl^- 淋溶, 导致高氮肥施用量处理中的氯离子浓度高于低氮肥施用量处理。通过相关分析, 我们还发现土壤盐分是降低作物产量的直接原因, 其中, Na^+ 、 Cl^- 和 EC 与氮素吸收效率、偏生产力及磷素吸收效率、偏生产力呈显著负相关 ($r < -0.60$)。在本研究中, 与单施化肥相比, 化肥配施黄腐酸均能够显著降低土壤盐分含量。而且与 CK 相比, 化肥减量配施黄腐酸均能够降低土壤中 Na^+ 、 Cl^- 含量。产生这种现象的原因可能是黄腐酸能够影响土壤盐基交换量, 促进土壤团粒结构的形成以及改善土壤水、肥、气、热状况, 从而能够控制和影响盐碱土壤中离子的固定、迁移和淋溶, 达到改良盐碱土壤的效果。因此, 化肥减量配施黄腐酸可以作为保证黄河三角洲盐碱耕地高产稳产及农业可持续发展的重要肥料管理措施。

4 结论

黄河三角洲盐渍农田的主要盐分是 NaCl , Na^+ 、 Cl^- 含量决定着 EC 值, 与氮素吸收效率、偏生产力及磷素吸收效率、偏生产力呈显著负相关。化肥减量可显著减少土壤盐分含量, 配施黄腐酸能够显著降低土壤中的 Na^+ 和 Cl^- 含量, 缓解盐碱胁迫对作物的影响, 提高冬小麦产量及氮、磷素吸收效率和偏生产力。减施氮肥能够提高冬小麦苗期和收获期 0—10 cm 土层的有效磷含量, 减施氮肥 30% 时土壤有效磷含量高于减施氮肥 15% 和常规施氮量。

参考文献:

- [1] 郝存抗, 周蕊蕊, 鹿鸣, 等. 不同盐渍化程度下滨海盐渍土有机碳矿化规律[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 36–42.
Hao C K, Zhou R R, Lu M, *et al.* Soil organic carbon mineralization of coastal soils with different salinity levels[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(1): 36–42.
- [2] Yu R H, Liu T X, Xu Y P, *et al.* Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1952–1960.
- [3] Abbas A, Khan S, Hussain N, *et al.* Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2013, 55–57(2): 43–52.
- [4] 徐恒刚. 中国盐生植被及盐碱化生态治理[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- Xu H G. Halophytes and ecological management of salinization in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004.
- [5] 马韬, 曾文治, 伍靖伟, 等. 不同施氮量下盐渍农田向日葵冠层生长与辐射利用规律[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 292–303.
Ma T, Zeng W Z, Wu J W, *et al.* Sunflower canopy development, radiation absorption and use efficiency under different nitrogen application rates in saline fields[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 292–303.
- [6] 李婧男, 孙向阳, 李素艳. 有机无机改良剂对滨海盐渍化土壤酶活性和土壤微生物量的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 160–165.
Li J N, Sun X Y, Li S Y. Effects of organic and inorganic amendment on soil enzyme activities and soil microbial biomass in coastal salinized soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 160–165.
- [7] 王海洋, 黄涛, 宋莎莎. 黄河三角洲滨海盐碱地绿化植物资源普查及选择研究[J]. *山东林业科技*, 2007, (1): 12–15.
Wang H Y, Huang T, Song S S. Resources and selection of greening plants in coastal alkali-saline soil of the Yellow River Delta[J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2007, (1): 12–15.
- [8] 张鹏锐, 李旭霖, 崔德杰, 等. 滨海重盐碱地不同土地利用方式的水盐特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 117–121, 203.
Zhang P R, Li X L, Cui D J, *et al.* Characteristics of water and salt under different land use in heavy coastal saline-alkaline land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 117–121, 203.
- [9] 乔玉辉, 宇振荣. 灌溉对土壤盐分的影响及微咸水利用的模拟研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 2050–2056.
Qiao Y H, Yu Z R. Simulation study on the effects of irrigation on soil salt and saline water exploration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2050–2056.
- [10] 王会, 何伟, 段福建, 等. 秸秆还田对盐渍土团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 124–131.
Wang H, He W, Duan F J, *et al.* Effects of straw returning on saline soil aggregate stability and its carbon, nitrogen contents[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(4): 124–131.
- [11] Ceccoli G, Senn M E, Bustos D, *et al.* Genetic variability for responses to short- and long-term salt stress in vegetative sunflower plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(6): 882–890.
- [12] 曾文治, 徐驰, 黄介生, 等. 土壤盐分与施氮量交互作用对葵花生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 86–94.
Zeng W Z, Xu C, Huang J S, *et al.* Interactive effect of salinity and nitrogen application on sunflower growth[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(3): 86–94.
- [13] Bruulsema T, Lemunyon J, Herz B. Know your fertilizer rights[J]. *Crops & Soils*, 2009, 42(2): 13–18.
- [14] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 783–795.
- Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 783–795.
- [15] Johnston A E, Poulton P R. Nitrogen in agriculture: An overview and

- definitions of nitrogen use efficiency[A]. Proceedings of the International Fertilizer Society[C]. York, UK, 2009: 2–49.
- [16] Masclaux-Daubresse C, Daniel-Vedele F, Dechorgnat J, *et al.* Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: Challenges for sustainable and productive agriculture[J]. *Annals of Botany-London*, 2010, 105: 1141–1157.
- [17] 邢晓鸣, 李小春, 丁艳锋, 等. 缓控释肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(24): 4892–4902.
- Xing X M, Li X C, Ding Y F, *et al.* Effects of types of controlled released nitrogen and fertilization modes on yield and dry mass production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(24): 4892–4902.
- [18] 梅晶晶, 周苏玫, 徐凤丹, 等. 小麦根蘖发育和产量对耕作和追氮方式以及施氮量的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(6): 1069–1080.
- Mei J J, Zhou S M, Xu F D, *et al.* Response of root and tiller development and yield of wheat to tillage and nitrogen topdressing patterns and nitrogen application rates[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(6): 1069–1080.
- [19] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, *et al.* Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1519–1520.
- [20] 田艺心, 曹鹏鹏, 张海英, 高凤菊. 磷肥减施对间作大豆/玉米农艺性状及产量、经济效益的影响[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(8): 85–89.
- Tian Y X, Cao P P, Zhang H Y, Gao F J. Effects of phosphate fertilizer reduction on agronomic characters, yield and economic benefits of intercropping soybean and corn[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(8): 85–89.
- [21] 郝中明, 李翠兰, 刘杭, 等. 施磷对春玉米磷肥利用及土壤磷素转化的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20200703.0929.001.html>.
- Hao Z M, Li C L, Liu H, *et al.* Effect of phosphorus application on phosphorus utilization of spring maize and soil phosphorus transformation[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20200703.0929.001.html>.
- [22] 韩瑛祚, 姜春荣, 王秀娟, 等. 生物炭还田条件下磷肥减施对玉米产量及养分利用的影响[J]. *玉米科学*, 2018, 26(2): 125–130.
- Han Y Z, Lou C R, Wang X J, *et al.* Effects of phosphorus fertilizer reduction on maize yield and nutrient utilization under biochar returning[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(2): 125–130.
- [23] 赵伟, 杨圆圆, 蒋丽媛, 等. 减施磷肥提高设施番茄氮磷钾生理效率并减少土壤速效磷累积[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1710–1718.
- Zhao W, Yang Y Y, Jiang L Y, *et al.* Reducing conventional phosphorus input increase physiological efficiencies of absorbed nitrogen, phosphorus and potassium in greenhouse tomato and decrease soil available phosphorus accumulation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1710–1718.
- [24] 马琴, 刘小雨, 冉瑾怡, 等. 磷肥减量结合硫酸铵配施提高西北地区旱地春玉米磷素利用效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(6): 1047–1058.
- Ma Q, Liu X Y, Ran J Y, *et al.* Improving phosphorus use efficiency of spring maize by reducing phosphate fertilizer rate and replacing urea with ammonium sulfate in dryland of Northwest China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(6): 1047–1058.
- [25] Bedada W, Karlton E, Lemenih M, *et al.* Long-term addition of compost and NP fertilizer increases crop yield and improves soil quality in experiments on smallholder farms[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 195(1): 193–201.
- [26] Pfister M, Saha S. Effects of biochar and fertilizer management on sunflower (*Helianthus annuus* L.) feedstock and soil properties[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2016, 63(5): 651–662.
- [27] Zhou X, Lu Y H, Liao Y L, *et al.* Substitution of chemical fertilizer by Chinese milk vetch improves the sustainability of yield and accumulation of soil organic carbon in a double-rice cropping system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(10): 2381–2392.
- [28] Waqas M, Ahmad B, Arif M, *et al.* Evaluation of humic acid application methods for yield and yield components of mungbean[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5(15): 2269–2276.
- [29] 张玲. 黄腐酸和甜菜碱对苹果抗旱生理及果实产量品质的影响[D]. 西安: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2016.
- Zhang L. Effects of spraying fulvic acid and glycinebetaine on drought resistant physiology as well as fruit yield and quality of two malus species[D]. Xi'an: MS Thesis of Northwest A&F University, 2016.
- [30] 李静, 李世莹, 李青松. 黄腐酸用量对番茄产量及品质的影响[J]. *农学报*, 2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.6016.S.20201223.1711.004.html>.
- Li J, Li S Y, Li Q S. Effects of different amounts of fulvic acid on tomato yield and quality[J]. *Journal of Agriculture*, 2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.6016.S.20201223.1711.004.html>.
- [31] 孔柏舒, 焦树英, 李永强, 等. 黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 2371–2379.
- Kong B S, Jiao S Y, Li Y Q, *et al.* Effect of fulvic acid-modified bentonite on nitrogen leaching and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2371–2379.
- [32] 马栗炎, 姚荣江, 杨劲松. 氮肥及黄腐酸对盐渍土有机碳和团聚体特征的调控作用[J]. *土壤*, 2020, 52(1): 33–39.
- Ma L Y, Yao R J, Yang J S. Regulation of nitrogen and fulvic acid on soil organic carbon and aggregates in saline soil[J]. *Soils*, 2020, 52(1): 33–39.
- [33] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(10): 1768–1781.
- Pei X X, Dang J Y, Zhang D Y, *et al.* Effects of organic substitution on the yield and nutrient absorption and utilization of wheat under chemical fertilizer reduction[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(10): 1768–1781.
- [34] 赵俊晔, 于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(4): 484–490.
- Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(4): 484–490.
- [35] Wang D Y, Guo L P, Zheng L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer and water management practices on nitrogen leaching from a typical open

- field used for vegetable planting in northern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 913–921.
- [36] Huang P, Zhang J B, Zhu A N, *et al.* Nitrate accumulation and leaching potential reduced by coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610-611: 1020–1028.
- [37] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 270–277.
Zhang S L, Tong Y A, Liang D L, *et al.* Nitrate-N movement in the soil profiles as influenced by rate and timing of nitrogen application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 270–277.
- [38] Zhao Q, Zeng D H. Nitrogen addition effects on tree growth and soil properties mediated by soil phosphorus availability and tree species identity[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 449: 117478.
- [39] 陈治嘉, 隋标, 赵兴敏, 等. 吉林省黑土区玉米氮肥减施效果研究[J]. *玉米科学*, 2018, 26(6): 139–145.
Chen Z J, Sui B, Zhao X M, *et al.* Effect of nitrogen reduction on maize in black soil area of Jilin Province[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(6): 139–145.
- [40] 李军, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐植酸尿素对玉米生长及肥料氮利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 524–530.
Li J, Yuan L, Zhao B Q, *et al.* Effect of urea containing humic acid on maize growth and N utilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(2): 524–530.
- [41] 姚媛媛, 王晓琪, 杨越超, 等. 控释尿素与黄腐酸提高稻麦轮作系统产量和效益的协同效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(12): 2122–2132.
Yao Y Y, Wang X Q, Yang Y C, *et al.* Yield and economic profit synergism of controlled release urea and fulvic acid in rice–wheat rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12): 2122–2132.
- [42] Liu M L, Wang C, Wang F Y, *et al.* Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 142: 147–154.
- [43] 于艳梅. 施磷量和磷肥品种对作物产量和瘠土磷库的影响[D]. 西安: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2020.
Yu Y M. Effects of phosphate fertilizer rates and types on crop yield and soil phosphorus pool on Eum-Orthic Anthrosols[D]. Xian: MS Thesis of Northwest A&F University, 2020.
- [44] Li H, Huang G, Meng Q, *et al.* Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1–2): 157–167.
- [45] 张丽丽, 史庆华, 巩彪. 中、碱性土壤条件下黄腐酸与磷肥配施对番茄生育和磷素利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(17): 3567–3575.
Zhang L L, Shi Q H, Gong B. Application of fulvic acid and phosphorus fertilizer on tomato growth, development, and phosphorus utilization in neutral and alkaline soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(17): 3567–3575.
- [46] 李军. 腐植酸对氮、磷肥增效减量效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2017.
Li J. The study of humic acid on raising N and P fertilizer efficiency and reducing application rates[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.