

DOI:10.11686/cyxb2025213

http://cyxb.magtech.com.cn

王奕涵, 史路萌, 李志坚, 等. 草种及生物炭添加对东北苏打盐碱地改良及牧草生长的影响. 草业学报, 2026, 35(5): 139—150.

WANG Yi-han, SHI Lu-meng, LI Zhi-jian, *et al.* Effects of grass species and biochar application rate on soda saline-alkali soil improvement and forage growth in northeast China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(5): 139—150.

草种及生物炭添加对东北苏打盐碱地改良及牧草生长的影响

王奕涵, 史路萌, 李志坚, 周帮伟*

(东北师范大学植被生态科学教育部重点实验室, 吉林松嫩草地生态系统国家野外科学观测研究站, 吉林 长春 130024)

摘要: 松嫩平原土壤面临盐碱化持续加剧的生态威胁。本研究拟构建秸秆生物炭添加(CK: 0 t·hm⁻²、T₁: 20 t·hm⁻²、T₂: 40 t·hm⁻²)结合耐盐碱牧草(羊草、星星草)的人工草地建植体系, 分析生物炭添加对于土壤理化性质、牧草生理及生产性能的影响。结果表明: 添加生物炭第一年土壤 pH、电导率未见显著变化; 次年 T₁ 处理土壤 pH 和电导率降幅最大, 且随着生物炭添加导致含水量、孔隙度持续升高, 土壤容重持续下降。生物炭添加使羊草土壤钠离子(Na⁺)含量显著降低($P < 0.05$), 而星星草土壤 Na⁺ 含量仅在次年显著下降。土壤钙离子(Ca²⁺)含量在两年观测期内 T₁ 处理较 CK 处理均有所升高, 第二年较为显著(羊草: 0.91~1.60 mg·kg⁻¹; 星星草: 0.91~1.08 mg·kg⁻¹)。镁离子(Mg²⁺)含量在第一年 T₂ 处理星星草种植下降低 35.2% ($P < 0.05$), 次年两种牧草 T₂ 处理土壤 Mg²⁺ 含量均显著升高(羊草 45.5%, 星星草 66.8%)。2 种牧草土壤钠吸附比(SAR)和碱化度(ESP)总体呈现 T₁ 处理下显著降低, 而 T₂ 处理下的变化趋势波动较大。土壤铵态氮(NH₄⁺-N)与硝态氮(NO₃⁻-N)含量均呈现第一年无显著变化, 而第二年 T₁、T₂ 处理的土壤铵态氮(NH₄⁺-N)含量较 CK 处理均显著升高, 硝态氮(NO₃⁻-N)含量均有所升高。生物炭添加可以显著提升羊草的叶绿素含量(T₁、T₂ 处理分别提高 10.3% 和 8.2%), 降低脯氨酸(T₁、T₂ 处理分别降低 18.7% 和 38.1%)和可溶性糖含量(T₁、T₂ 处理分别降低 15.0% 和 26.7%)。在土壤—植物协同作用下, 生物炭添加可显著提升羊草的饲草产量(T₁、T₂ 处理分别提高 12.9% 和 18.3%), 而对星星草的相关生理指标影响均不显著, 仅在 T₂ 处理呈现饲草产量增产 28.8%, 表明添加较高的生物炭才能促进星星草的产量提升。此外对比分析牧草对土壤的改良效果发现, 羊草对钠离子的消减程度较星星草更好。因此, 在中度盐碱区优先采用生物炭—羊草协同人工草地建植模式, 有利于修复退化草地和提升人工草地的饲草产量。

关键词: 盐碱地; 生物炭; 土壤改良; 羊草; 星星草

Effects of grass species and biochar application rate on soda saline-alkali soil improvement and forage growth in northeast China

WANG Yi-han, SHI Lu-meng, LI Zhi-jian, ZHOU Bang-wei*

Key Laboratory of Vegetation Ecology Science, Ministry of Education, Northeast Normal University, Jilin Songnen Grassland Ecosystem National Field Scientific Observation and Research Station, Changchun 130024, China

Abstract: The Songnen Plain faces an escalating ecological threat due to persistent soil salinization. This study aimed to establish an artificial grassland system integrating straw biochar application (CK: 0 t·ha⁻¹, T₁: 20 t·ha⁻¹, T₂: 40

收稿日期: 2025-05-27; 改回日期: 2025-07-21

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28110303), 国家重点研发计划(2022YFD1500503)和吉林省现代农业产业技术体系建设示范项目(JLARS-2025-050301)资助。

作者简介: 王奕涵(2005—), 女, 辽宁海城人, 在读硕士。E-mail: 1395173600@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhoubw599@nenu.edu.cn

t·ha⁻¹) with *Leymus chinensis* and *Puccinellia tenuiflora*, two forage grasses tolerant to salt-alkali soil. We analyzed the effects of biochar addition on soil physicochemical properties, grass physiology, and production performance. The results showed that soil pH and electrical conductivity did not significantly change in the first year following biochar application. However, in the second year, the soil pH and electrical conductivity showed the largest decreases in the T₁ treatment, with increasing biochar application leading to sustained increases in water content and porosity and continuous decreases in soil bulk density. Biochar addition significantly reduced the sodium ion (Na⁺) content in soil in *L. chinensis* grassland ($P < 0.05$), whereas the soil Na⁺ content in *P. tenuiflora* grassland only decreased in the second year. The calcium ion (Ca²⁺) content in soil was higher in the T₁ treatment than in CK over the 2-year observation period, with the difference being more pronounced in the second year (*L. chinensis*: 0.91–1.60 mg·kg⁻¹; *P. tenuiflora*: 0.91–1.08 mg·kg⁻¹). The magnesium ion (Mg²⁺) content in soil decreased by 35.2% ($P < 0.05$) under the T₂ treatment in *P. tenuiflora* grassland in the first year, while in the second year, the soil Mg²⁺ content significantly increased under the T₂ treatment in both grasslands (*L. chinensis*: 45.5%, *P. tenuiflora*: 66.8%). In both grasslands, the sodium adsorption ratio (SAR) and exchangeable sodium percentage (ESP) of the soil generally showed significant reductions under the T₁ treatment, but showed greater fluctuations in the T₂ treatment. The contents of soil ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) and nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) in soil did not change significantly in the first year. However, in the second year, the ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) content in soil was significantly higher in the T₁ and T₂ treatments than in CK, and the nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) content in soil was also increased. Biochar application significantly enhanced the chlorophyll content in *L. chinensis* (T₁: 10.3%, T₂: 8.2%), but reduced the contents of proline (T₁: 18.7%, T₂: 38.1%) and soluble sugars (T₁: 15.0%, T₂: 26.7%). Under the synergistic soil-plant interaction in this grassland system, biochar addition significantly increased the forage yield of *L. chinensis* (T₁: 12.9%, T₂: 18.3%), but only the T₂ treatment promoted the forage yield of *P. tenuiflora* (by 28.8%), indicating that a higher biochar application rate is required to increase *P. tenuiflora* yield. Comparative analysis of the effects of forage grasses to improve soil quality revealed that *L. chinensis* reduced the Na⁺ content more effectively than did *P. tenuiflora*. Therefore, priority should be given to the integrated biochar-*L. chinensis* artificial grassland system in moderately saline-alkali regions, because it facilitates the restoration of degraded grassland and enhances the forage yield.

Key words: saline-alkali land; biochar; soil improvement; *Leymus chinensis*; *Puccinellia tenuiflora*

土壤盐碱化是影响土壤质量和初级生产力的重要因素。松嫩平原作为我国盐碱地主要分布区之一,盐碱地面积达 3.73×10^6 hm²,是我国北方重要的农牧业基地^[1]。该地区盐碱地以碳酸盐和重碳酸盐为主,属于典型的内陆苏打盐碱地类型^[2]。近年来由于人类过度牧垦、不合理灌溉以及微地形地貌、地表径流、气候降水冻融等多方面因素影响^[3],土地盐碱化趋势不断加剧,严重制约农牧业生产、社会经济和生态系统的绿色可持续发展。因此,通过高效且经济的改良手段,改善土壤质量、提升人工草地生产力水平刻不容缓。

围绕盐碱地的土壤改良,诸多学者提出了多种行之有效的治理方法,主要包括物理方法(例如:地表覆沙、合理深耕、平整土地、客土等^[4])、化学方法(例如:利用石膏中的钙离子替换钠离子^[5]并使用灌溉排盐,或施用生物炭、有机肥等改良剂改良土壤^[6]等)、水利工程方法(例如:灌溉冲洗结合配套排水系统建设^[7])、生物方法(如种植耐盐碱作物、接种有益微生物^[8]等)以及多手段综合改良法等。其中,物理、化学及水利工程方法虽见效快,但投资大,物理方法效果短暂、化学方法易造成二次污染;而生物方法虽生态效益显著但周期较长。通常多种手段协同应用在苏打盐碱地的改良过程中更具优势。

生物炭是由生物质在限氧条件下高温热解(通常300~800 °C)制成的富碳材料,因其功能的多样性,目前被广泛研究。作为连接农业可持续性、污染修复与气候行动的“多面手”,生物炭通过“废弃物资源化”实现环境效益

与经济效益的统一^[9]。目前,生物炭作为外源碳已被证实可以提高土壤肥力、有机质含量,促进微生物的生长繁殖,进而改善土壤理化性质、提升作物及饲草产量^[10]。

在长效、可持续的生物改良中,植物改良占据主要地位。松嫩盐碱草地优势物种星星草(*Puccinellia tenuiflora*)和羊草(*Leymus chinensis*)均具有较好的耐盐碱性、饲草利用性和生态修复性,但二者在盐碱地建植过程中常面临盐碱、干旱等问题而难以人工栽培建植。盐碱地土壤易板结,且抑制种子的吸胀发芽,保水性较难,而生物炭的添加可以使土壤含水量上升,增加保水效果。因此,在盐碱地人工栽培牧草过程中结合生物炭的应用,可形成有效的土壤改良和生态恢复策略。施加生物炭可以改善土壤的理化性质,因此在羊草和星星草出苗与生长过程中可以利用此优势而快速建成群体,进而提高牧草产量,为畜牧业提供优质的饲料来源,推动畜牧业的可持续发展。

为了改良东北苏打盐碱土壤,并利用其生产优良饲草,本研究拟添加秸秆生物炭结合星星草与羊草两种不同作物的种植,通过对土壤理化性质的分析、牧草农艺、生理性状的比较,全面解析生物炭对苏打盐碱土的改良效果及对牧草生长的作用机理,为生物炭在盐碱土的应用提供重要的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本试验地点位于东北师范大学长岭种马场北甸子盐碱化试验田(44°45' N, 123°45' E)。该区位于欧亚大陆草原东缘,为典型的农牧交错区,属半干旱大陆性季风气候,年平均气温约 4.9 °C,冬夏温差较大,夏季气候炎热,最高气温可达 35 °C 左右;冬季气候寒冷,最低气温可至 -35 °C。年平均降水量为 300~400 mm,多集中于 6—9 月的植物生长季。2022 年试验站牧草生长季累计降水量为 1265.2 mm,其中 7 和 8 月降水量均在 300 mm 以上,气温在 25 °C 以上;9 和 10 月的降水量和气温较低,降水几乎没有,气温为 15 °C 左右;2023 年牧草生长季累计降水量为 419.8 mm,其中 7 月降水量和气温均最大,分别达 352.6 mm、28 °C,6、10 月降水量较低,几乎为 0 mm。

1.2 试验材料

羊草选用‘吉生 1 号’,为多年生植物,具有抗旱、抗涝、抗盐碱的特性和适应性。星星草,多年生植物,种子来源为东北师范大学育成的具备野生种质的稳定品系。生物炭购自郑州泰岩净水材料有限公司,由玉米(*Zea mays*)秸秆在 450 °C 左右热分解 2 h 制备,其基本理化性质如表 1 所示。

表 1 生物炭基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of biochar

pH	水分 Moisture (%)	有机碳 Organic carbon (OC, %)	磷 Phosphorus (P, %)	氮 Nitrogen (N, %)	钾 Potassium (K, %)	养分含量 Nutrients content (%)
8.5	15.3	63.7	0.97	1.52	2.84	5.33

养分含量为磷、氮、钾元素含量的总和。Nutrient content is the sum of phosphorus, nitrogen and potassium elements.

1.3 试验设计

在东北师范大学长岭种马场北甸子盐碱化试验田(44°45' N, 123°45' E),设置 3 个不同生物炭处理,其中包括:对照处理(CK,无生物炭添加的羊草与星星草栽培)、添加生物炭处理 1(T₁,生物炭添加量为 20 t·hm⁻²的羊草与星星草栽培)、添加生物炭处理 2(T₂,生物炭添加量为 40 t·hm⁻²的羊草与星星草栽培),每个小区面积为 15 m² (3 m×5 m),5 次重复。播种前将生物炭按照所设置的对应浓度撒于土壤表面,通过旋耕机将生物炭和 0~20 cm 土层土壤混合均匀,全田不施加其他肥料。

播种前,利用 5 点取样法^[11]采集各小区土样,分析试验田的基本理化性质。结果如表 2 所示。

2022 年 6 月,采用移栽方法种植羊草,移栽时需选择长势良好的羊草苗,并将其顶端剪掉,留地上部分(约 4~5 cm),行距 30 cm,株距 10 cm。星星草采用条播方式播种,深度 1~2 cm,行距 20 cm,每个小区 14 行,播种量为 45 kg·hm⁻²。

表2 试验田土壤基础理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of experimental field soil

含水量	pH	电导率	有效磷	有机质	铵态氮	硝态氮	速效钾
Water content (WC, %)		Electric conductivity (EC, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Available phosphorus (AP, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Organic matter (OM, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Available potassium (AK, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
13.27	8.60	268	18.45	8.47	3.72	5.62	139.42

有效磷为磷元素含量,速效钾为钾元素含量,下同。Available phosphorus is the phosphorus content, and available potassium is the potassium content, the same below.

1.4 样品采集与测定

于2022和2023年6月,在各个小区采用5点取样法^[11]采集0~20 cm土层土壤样品,用2 mm筛去除石块、碎根等杂物。采用环刀法^[12]测定土壤容重。所有样本采集筛选完毕后,将每份土样分为两份,一份用于土壤理化性质和养分含量的测定,另一份则储存于-80 °C冰箱内,用于测定土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)等指标。

1.4.1 土壤理化性质的测定方法 钠(Na^+)、钙(Ca^{2+})、镁(Mg^{2+})离子含量:称取过0.85 mm筛的风干土10.0 g,加入50.0 mL蒸馏水后,振荡离心,取上清液用原子吸收分光光度计(TAS-990F,中国)测相应离子含量。钠吸附比(sodium adsorption ration, SAR)和碱化度(exchangeable sodium percentage, ESP):分别参照孟昭甫^[13]的方法及中华人民共和国林业行业标准^[14]计算。土壤含水量:采用烘干恒重法^[15]测定。孔隙度=(1-土壤容重/土壤比重) $\times 100\%$,土壤比重的测定参考李海宽等^[16]的方法。pH与电导率:依据土水比1:5的比例用超纯水(ultrapure water, UP)浸提土壤样品,振荡并静置后用pH计(pHS-25,中国)、电导率仪(DDS-11A,中国)对上清液进行pH、电导率的测定。

1.4.2 土壤养分含量的测定 有效磷、有机碳含量:分别参照中华人民共和国国家环境保护标准—土壤有效磷^[17]、有机碳^[18]的测定方法。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量:参考国家标准—土壤硝态氮、亚硝态氮和铵态氮^[19]的测定方法。

1.4.3 植物农艺性状的测定 2023年7月下旬,羊草和星星草种子进入成熟期,进行农艺性状和产量性状的测定。株高、茎粗、茎叶比、穗长、叶宽:参照张琦等^[20]的方法测定。饲草产量:参照刘青松等^[21]的方法测定。

1.4.4 植物生理指标的测定 选取羊草和星星草的完全展开顶叶进行采样与相关指标分析。叶绿素含量(chlorophyll content, Chl):生长茂盛时,每个小区随机选取10株,用叶绿素仪(SPAD-502,日本)在叶片中部位置测定,尽量避开叶脉,记录平均值。可溶性糖含量(soluble sugar content, SSC)和脯氨酸含量(proline content, Pro):参照鲁存海^[22]的方法测定。

1.5 数据统计与分析

采用SPSS 26.0软件分析数据。利用多因素方差分析(multifactorial-way ANOVA)和最小显著性差异(least significant difference, LSD)事后检验方法评价不同牧草不同生物炭处理间的土壤基本理化性质、营养物质含量及盐碱化指标的差异显著性,不同生物炭处理下的牧草在成熟期的生长性状以及牧草内含物的差异显著性;评价两年内生物炭处理、植物、年份因素对土壤交互作用的影响;对牧草产量与土壤指标、牧草内含物使用皮尔逊(Pearson)相关系数进行双尾检验从而得到相关性分析, $P<0.05$ 为显著相关, $P<0.01$ 为极显著相关。采用WPS office和Origin 2025绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同浓度生物炭、不同牧草对土壤理化性质的影响

以不同浓度生物炭处理、不同牧草和不同年份作为自变量,土壤理化性质指标作为因变量,进行方差分析(图1),结果表明:在盐碱地上加入生物炭处理后,种植羊草和星星草的条件下,土壤第一年pH和电导率在不同处理间均无显著差异($P>0.05$),第二年pH与电导率在 T_1 处理下均显著低于CK和 T_2 ($P<0.05$)。羊草土壤含水量,

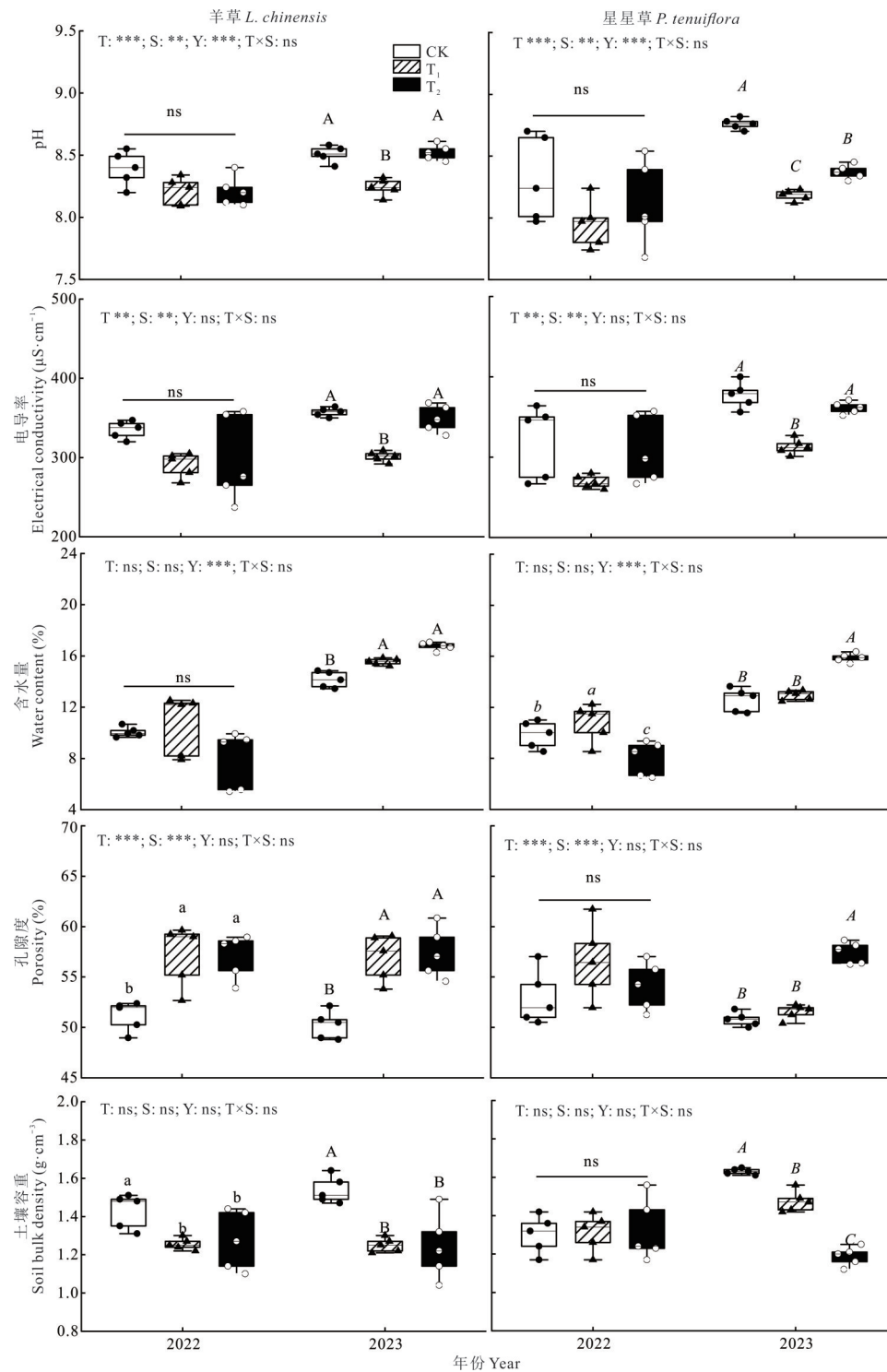


图 1 添加生物炭及种植不同牧草对土壤 pH、电导率、含水量、孔隙度和容重的影响

Fig. 1 Effects of biochar addition and cultivation of different forage grass species on soil pH, electrical conductivity, water content, porosity, and bulk density

CK、T₁、T₂ 分别表示生物炭的施用量为 0、20、40 t·hm⁻²。T 表示生物炭的施用量；Y 表示年份；S 表示物种。ns 表示差异不显著，** 表示在 0.01 水平上差异显著，*** 表示在 0.001 水平上差异显著。2022 年种植羊草组内差异显著性用 a、b、c 表示，2022 年种植星星草组内差异显著性用 a、b、c 表示；2023 年种植羊草组内差异显著性用 A、B、C 表示，2023 年种植星星草组内差异显著性用 A、B、C 表示。CK, T₁, and T₂ represent biochar application rates of 0, 20 and 40 t·ha⁻¹, respectively. T denotes the biochar application rate; Y represents the year; S indicates the species. ns indicates no significant difference, ** indicates a significant difference at the 0.01 level, and *** indicates a significant difference at the 0.001 level. Within-group significant differences for *L. chinensis* planted in 2022 are denoted by a, b, c; for *P. tenuiflora* planted in 2022, they are denoted by a, b, c. Within-group significant differences for *L. chinensis* planted in 2023 are denoted by A, B, C; for *P. tenuiflora* planted in 2023, they are denoted by A, B, C.

第一年无显著差异,第二年随生物炭用量增加显著上升;星星草土壤含水量经过第一年生物炭处理后表现为 T_1 处理下最高,而次年呈现出与羊草大体相同的趋势, T_2 处理的土壤含水率均显著高于CK。对于土壤孔隙度,在种植羊草时两年内添加生物炭处理后均显著高于CK;在种植星星草时,第一年无显著差异,第二年 T_2 处理显著高于 T_1 与CK。对于土壤容重,在羊草种植条件下,各年度添加生物炭后相较于CK均显著降低;在星星草种植条件下,仅第二年添加生物炭相较于CK显著降低($P<0.05$)。对比羊草与星星草两个物种种植情况下,物种对土壤pH、电导率、孔隙度存在显著影响;羊草种植下土壤的pH、孔隙度较星星草略偏高,电导率则略偏低。生物炭处理与物种的交互作用均未对土壤理化性质产生显著影响。

2.2 不同浓度生物炭、不同牧草对土壤盐离子和氮素状态的影响

以不同生物炭处理、不同牧草和不同年份作为自变量,土壤盐离子性状指标作为因变量,进行方差分析(表3),结果表明:在盐碱地上,与CK相比,加入生物炭处理后,两年内羊草的土壤 Na^+ 含量均表现为显著降低($P<0.05$),星星草土壤第一年无显著变化,第二年添加生物炭后显著降低。对于 Ca^{2+} 而言, T_1 较CK处理有所升高,第二年升高显著,而 T_1 较 T_2 处理除第二年星星草无显著差异外,不同物种不同年份均显著升高;第一年 Mg^{2+} 含

表3 添加生物炭及种植不同牧草对土壤盐离子和氮素状态的影响

Table 3 Effects of biochar addition and cultivation of different forage grass species on soil saline ions and nitrogen status

物种 Species (S)	处理 Treatment (T)	年份 Year (Y)	钠离子 Na^+ ($mg \cdot kg^{-1}$)	钙离子 Ca^{2+} ($mg \cdot kg^{-1}$)	镁离子 Mg^{2+} ($mg \cdot kg^{-1}$)	钠吸附比 Sodium adsorption ration (SAR, $mmol \cdot L^{-1}$)	碱化度 Exchange- able sodium per- centage (ESP, %)	铵态氮 NH_4^+-N ($mg \cdot kg^{-1}$)	硝态氮 NO_3^--N ($mg \cdot kg^{-1}$)
羊草 <i>L. chinensis</i>	CK	2022	168.71±9.90a	5.75±0.14ab	36.56±1.19a	7.79±0.22a	8.94±0.17a	4.40±0.55a	17.75±0.56a
	T_1	2022	103.86±8.12b	6.66±0.53a	32.13±6.36a	5.17±0.37b	6.00±0.48a	7.70±1.51a	19.91±2.51a
	T_2	2022	111.25±6.93b	4.72±0.72b	33.50±8.32a	6.70±1.27ab	7.62±1.47a	4.31±0.45a	16.21±2.24a
星星草 <i>P. tenuiflora</i>	CK	2022	178.96±7.04a	5.48±0.32ab	33.20±1.09a	9.26±0.31ab	10.89±0.36ab	4.50±0.44a	18.20±0.81a
	T_1	2022	166.18±8.90a	6.56±0.67a	43.00±4.05a	7.06±1.01b	8.21±1.22b	6.50±1.13a	24.68±2.75a
	T_2	2022	132.45±22.16a	4.11±0.78b	21.50±5.59b	11.44±1.28a	13.25±1.37a	4.25±0.25a	17.96±2.24a
羊草 <i>L. chinensis</i>	CK	2023	110.72±1.92A	3.98±0.02B	11.68±0.34B	14.36±0.45A	16.05±0.22A	3.31±0.14B	4.93±0.51B
	T_1	2023	84.95±0.92C	5.58±0.30A	13.27±0.49B	5.98±0.19C	7.05±0.11C	4.07±0.12A	5.61±0.35AB
	T_2	2023	95.14±0.73B	3.25±0.20C	17.00±0.49A	10.18±0.32B	11.77±0.39B	4.46±0.20A	6.91±0.09A
星星草 <i>P. tenuiflora</i>	CK	2023	97.89±3.07A	2.46±0.16B	7.99±0.48B	17.02±0.89A	18.66±0.90A	3.89±0.15B	5.63±0.35B
	T_1	2023	73.32±0.71B	3.37±0.18A	9.56±0.58B	6.57±0.15B	7.72±0.21B	4.40±0.20A	7.47±0.47A
	T_2	2023	79.84±1.37B	3.84±0.22A	13.33±0.13A	15.31±1.64A	16.43±1.89A	4.57±0.10A	6.93±0.09AB
T			9079.07**	32.20	327.08	1790.37***	1432.58***	35.24***	124.56***
S			4561.34*	42.11*	12.50	10.25	47.81	1.82	4.65
Y			8.50×10^4 ***	228.89***	1.50×10^4 ***	975.84***	712.96***	66.84***	3089.10***
T×S			9168.85**	17.12	197.39	145.37*	131.52*	1.06	5.48
T×Y			2315.07	92.27***	239.83	848.35***	660.22***	22.83*	91.52***
S×Y			745.70	4.34	190.60	17.01	3.58	0.71	0.26
T×S×Y			1.60×10^4	35.41	399.63	153.36	138.52	4.72	7.08

CK、 T_1 、 T_2 分别表示生物炭的施用量为0、20、40 $t \cdot hm^{-2}$ 。T表示生物炭的施用量;Y表示年份;S表示物种。*表示在0.05水平上影响显著,**表示在0.01水平上影响显著,***表示在0.001水平上影响显著。2022年种植羊草组内差异显著性用a、b、c表示,2022年种植星星草组内差异显著性用a、b、c表示;2023年种植羊草组内差异显著性用A、B、C表示,2023年种植星星草组内差异显著性用A、B、C表示。下同。CK, T_1 and T_2 represent biochar application rates of 0, 20 and 40 $t \cdot ha^{-1}$, respectively. T denotes the biochar application rate; Y represents the year; S indicates the species. * indicates a significant influence at the 0.05 level, ** indicates a significant influence at the 0.01 level, and *** indicates a significant influence at the 0.001 level. Within-group significant differences for *L. chinensis* planted in 2022 are denoted by a, b, c; for *P. tenuiflora* planted in 2022, they are denoted by a, b, c. Within-group significant differences for *L. chinensis* planted in 2023 are denoted by A, B, C; for *P. tenuiflora* planted in 2023, they are denoted by A, B, C. The same below.

量仅种植星星草时 T_2 处理下较 T_1 与 CK 显著降低, 第二年两种牧草种植下, T_2 处理下 Mg^{2+} 含量均显著高于 T_1 与 CK ($P < 0.05$)。对于 SAR 与 ESP, 除第一年种植羊草条件下, ESP 无显著差异外, 不同物种不同年份, T_1 处理下始终显著低于 T_2 、CK; 对于 NH_4^+-N 、 NO_3^--N , 两种牧草种植下, 第一年均无显著差异, T_1 、 T_2 处理的第二年土壤铵态氮 (NH_4^+-N) 较 CK 处理均显著升高, 硝态氮 (NO_3^--N) 均有所升高。羊草与星星草对比下, 仅 Na^+ 与 Ca^{2+} 含量在 0.05 水平上有显著差异, 羊草种植下不同处理的整体土壤 Na^+ 含量较星星草显著降低、 Ca^{2+} 含量升高。生物炭处理与物种的交互作用对 Na^+ 含量、SAR 和 ESP 存在显著影响 ($P < 0.05$)。此外, 年份对于土壤盐离子和氮素状态均有显著影响。

2.3 生物炭添加对牧草农艺性状及饲草产量的影响

生物炭处理显著增加羊草饲草产量 ($P < 0.05$), 分别比对照增加了 12.9% 和 18.3%; 星星草饲草产量分别比对照增加了 3.6%、28.8%, 表明中、重度盐碱土壤添加生物炭对羊草建植效果较好, 而只有重度盐碱地添加生物炭才使星星草的产量增加。除茎粗外, 物种对各农艺性状及饲草产量均有极显著影响 ($P < 0.001$, 表 4)。

T_2 处理下羊草的株高较 CK 显著升高, 叶宽和穗长较 T_1 、CK 均显著提高 ($P < 0.05$), 而在添加生物炭的星星草处理下上述指标未见显著性差异 ($P > 0.05$)。对于茎粗而言, 两种牧草 T_2 处理下均显著高于 T_1 、CK; 添加生物炭后, 羊草茎叶比无显著差异, 星星草茎叶比则显著高于 CK 组。生物炭处理对各农艺性状及饲草产量均有显著影响。

表 4 生物炭添加对牧草农艺性状及饲草产量的影响

Table 4 Effects of biochar application on agronomic traits and forage yield

物种 Species (S)	处理 Treatment (T)	产量 Yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	茎叶比 Ratio of stem to leaf	穗长 Ear length (cm)	叶宽 Leaf width (mm)
羊草 <i>L. chinensis</i>	CK	1789.68±38.73B	82.10±1.68B	1.78±0.04B	2.64±0.11A	18.68±0.43B	5.56±0.10B
	T_1	2020.80±69.09A	88.24±3.75AB	1.84±0.05B	3.20±0.22A	18.70±0.37B	5.28±0.29B
	T_2	2117.52±38.63A	92.88±0.69A	2.10±0.03A	2.98±0.21A	20.60±0.56A	6.92±0.37A
星星草 <i>P. tenuiflora</i>	CK	574.20±43.97B	49.08±2.94A	1.68±0.11B	3.35±0.05B	14.48±0.45A	14.46±0.96A
	T_1	594.90±35.51AB	48.72±1.08A	1.62±0.06B	4.33±0.22A	15.22±0.14A	20.60±2.51A
	T_2	739.50±26.77A	52.50±2.72A	2.12±0.06A	4.66±0.33A	15.48±0.35A	21.76±1.44A
T		3.00×10^5 ***	254.95*	0.96***	4.28**	11.47**	97.65**
S		1.30×10^7 ***	1.10×10^4 ***	0.08	10.37***	136.53***	1271.40***
T×S		6.10×10^4	80.97	0.07	1.18	3.38	63.94*

2.4 添加生物炭后牧草饲草产量与土壤理化性质的相关性

两种牧草的饲草产量均与土壤含水量、孔隙度呈显著正相关, 与土壤容重呈显著负相关; 且羊草饲草产量还与土壤有效磷、有机碳、铵态氮、硝态氮呈显著正相关 (表 5)。

2.5 生物炭添加对牧草生理性状的影响

牧草的生理指标可以间接体现牧草的生长环境胁迫程度, 通常土壤盐碱化加剧会提升可溶性糖与脯氨酸的含量。以不同生物炭处理、不同牧草和不同年份作为自变量, 植物生理性状指标作为因变量, 进行方差分析 (表 6), 结果显示: 不同处理、不同物种对植物叶绿素、脯氨酸和可溶性糖含量均存在显著影响。添加生物炭后, 羊草的叶绿素含量显著升高, T_1 处理的可溶性糖和脯氨酸含量较 CK 有所降低, T_2 处理较 CK 显著降低; 而星星草各处理间无显著差异 ($P > 0.05$)。此外, 生物炭处理与物种的交互作用对叶绿素与脯氨酸含量均有显著影响 ($P < 0.01$)。

表5 饲草产量与土壤理化性质间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between forage yield and soil physicochemical properties

物种 Species	项目 Items	产量 Yield	含水量 Water content	土壤容重 Soil bulk density	孔隙度 Porosity	有效磷 Available phosphorus	有机碳 Organic carbon	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N
羊草 <i>L. chinensis</i>	含水量 Water content	0.656**						
	土壤容重 Soil bulk density	-0.612*	-0.813**					
	孔隙度 Porosity	0.643**	0.618*	-0.507				
	有效磷 Available phosphorus	0.660**	0.725**	-0.483	0.718**			
	有机碳 Organic carbon	0.660**	0.683**	-0.551*	0.757**	0.873**		
	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0.721**	0.712**	-0.529*	0.662**	0.912*	0.700**	
星星草 <i>P. tenuiflora</i>	含水量 Water content	0.607*						
	土壤容重 Soil bulk density	-0.666**	-0.818**					
	孔隙度 Porosity	0.707**	0.900**	-0.906**				
	有效磷 Available phosphorus	0.345	0.592*	-0.736**	0.690**			
	有机碳 Organic carbon	0.510	0.639*	-0.804**	0.741**	0.718**		
	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0.345	0.578*	-0.560*	0.512	0.608*	0.337	
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0.234	0.116	-0.342	0.184	0.554*	0.472	0.373	

*表示在0.05水平上相关性显著,**表示在0.01水平上相关性显著。* indicates a significant correlation at the 0.05 level, ** indicates a significant correlation at the 0.01 level.

表6 生物炭添加对牧草生理指标的影响

Table 6 Effects of biochar application on forage physiological traits

物种 Species (S)	处理 Treatment (T)	叶绿素含量 Chlorophyll content (Chl, SPAD values)	可溶性糖含量 Soluble sugar content (SSC, mg·g ⁻¹)	脯氨酸含量 Proline content (Pro, mg·g ⁻¹)
羊草 <i>L. chinensis</i>	CK	43.18±0.66B	2.47±0.11A	15.87±1.42A
	T ₁	47.64±0.99A	2.10±0.20AB	12.90±1.33AB
	T ₂	46.70±0.75A	1.81±0.06B	9.82±0.44B
星星草 <i>P. tenuiflora</i>	CK	39.20±0.12A	4.13±0.33A	65.54±2.91A
	T ₁	36.80±0.18A	3.42±0.13A	46.56±0.51A
	T ₂	39.60±0.24A	3.77±0.17A	31.85±5.28A
	T	25.76**	1.84*	1981.31***
	S	1.30×10 ⁴ ***	20.32***	9250.99***
	T×S	29.74**	0.50	962.72***

2.6 牧草的饲草产量与其内含物的相关性

两种牧草的饲草产量均与脯氨酸含量显著负相关;对于可溶性糖而言,羊草的饲草产量与其呈显著负相关关系,而星星草无显著相关性(图2)。

3 讨论

3.1 添加生物炭对土壤性质的影响

在苏打盐碱土壤中添加生物炭,土壤孔隙度显著提高、土壤容重显著降低,主要归因于多孔结构生物炭的加入增加了土壤内部的空间,使结构更疏松,从而降低土壤体积质量(即土壤容重),增加孔隙度^[23]。这种结构改良

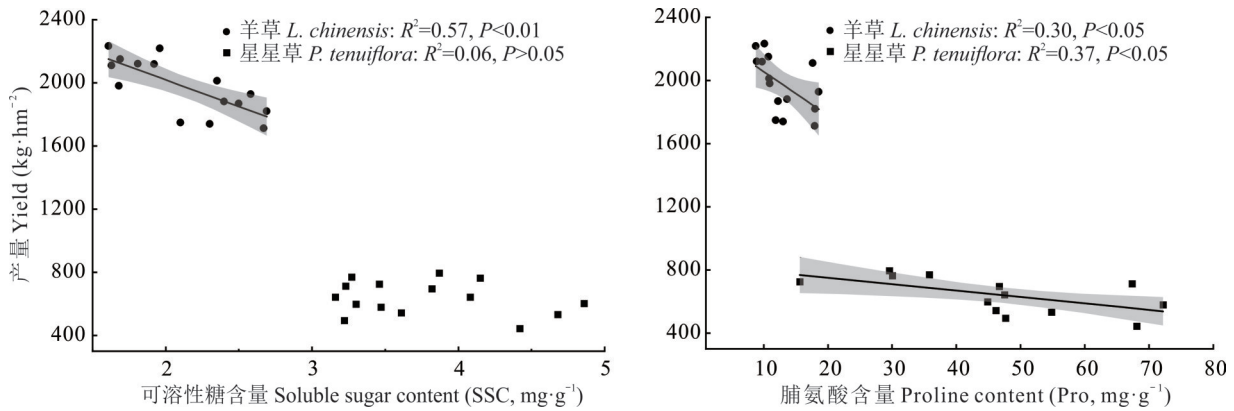


图 2 饲草产量与牧草内含物的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between forage yield and forage constituents

效应同时解释了土壤含水量提升的现象,因为增加的孔隙网络显著增强了土壤的持水能力^[24]。目前生物炭对于 pH 的影响程度不一,主要与生物炭种类特性有关。本试验中生物炭添加对土壤 pH 的影响呈现时间异质性和剂量依赖性,加入不同生物炭处理后,第一年可能由于土壤自身强大的缓冲能力无显著变化;而第二年,pH 与电导率呈现先降低再升高的变化趋势,主要原因可能为 T_1 处理条件增加了微生物的硝化作用加之使用的生物炭 pH 较土壤 pH 略低,导致整体 pH 的降低^[25]。同时,由于土壤含水量的增加及生物炭能有效吸附盐离子,土壤电导率也随之降低^[26]; T_2 处理则可能由于添加了高剂量的生物炭,其所携带的可溶性碱离子及矿物质^[27]均可提高土壤 pH 及电导率, T_2 处理下土壤 pH 及电导率与对照组无显著差异但高于对照组。

本试验中添加生物炭后, Na^+ 含量显著降低,可能因为生物炭表面的官能团和吸附中心能很好地吸附土壤中的 Na^+ ,加之生物炭还会在土壤表面提供保护层,从而减少蒸发并阻止盐度随着水分向上移动^[28]。同时由于生物炭本身具有较高的钙、镁元素,且生物炭可释放常量营养素和微量营养素 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ^[29]、氮^[30]等)抵消高盐浓度的负面影响,从而置换 Na^+ ,致使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量升高, Na^+ 含量降低。在 T_2 处理下,由于生物炭能促进植物对钙、镁的吸收(尤其是钙离子),因此添加不同量的生物炭,钙离子呈先升高再降低的变化趋势, SAR 与 ESP 也随之先降低再升高。而羊草种植下土壤 Na^+ 含量较星星草种植下显著降低、 Ca^{2+} 含量显著升高,可能由于羊草根系周围的生物量较大,有助于生物炭的交换作用。此外,生物炭对土壤酶活性和细菌丰度有间接影响,从而促进氮的转化过程及释放^[31],且生物炭会减少 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的浸出^[32],也会导致 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的增加^[33]。

3.2 添加生物炭对牧草性状及饲草产量的影响

本研究中添加生物炭后两种牧草的饲草产量均显著提高,主要由于生物炭使土壤含水量增加,保水效果更好,从而在盐碱地中缓解水分胁迫并支持最佳的光合作用活性^[34],同时,生物炭的多孔结构使土壤孔隙度增加,通气性较好,为微生物群落的构建^[35]及根系生长提供了良好的支撑,且羊草的微生物丰度较星星草高^[36],可以有效地促进营养物质的吸收运输,增加茎粗与饲草产量。此外,羊草对生长环境的耐受范围较星星草小,羊草饲草产量的提升还与土壤有效磷、有机碳、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 有关。有研究表明,添加生物炭可以改善土壤的微生物特性^[37],有效地提高植物对土壤养分的利用率^[38],从而促进植株生长,增加株高、叶宽、穗长等从而提高饲草产量。

而植物的生长也会较好的促进土壤的改良。邓小宇等^[39]从羊草和星星草两种牧草根际共筛选到 27 株具有溶磷能力的菌株(其中羊草 20 株、星星草 7 株)可以促进有效磷的增加,且增加量超过 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的菌株有 4 株,从而降低了土壤 pH,改良盐碱地。

脯氨酸的积累被认为是植物在缺水条件下减少损害的反应之一^[40],本试验中添加生物炭后,改善了土壤的质地,优良的生长条件会促进植物生长,降低脯氨酸的合成,脯氨酸与饲草产量呈负相关关系可以间接证明上述观点。同时由于生物炭的添加,盐分浓度降低,较为敏感的羊草体内渗透物质(可溶性糖)的含量也会随之下降,因

此与饲草产量也呈负相关关系^[41]。此外,添加生物炭后羊草的叶绿素含量显著增加^[42],加之土壤氮素含量与作物的饲草产量息息相关^[43],添加生物炭可以提高土壤的氮素含量等理化性质从而实现对植物生理稳态的调节,同时生物炭对羊草的群体建立更有优势,表明生物炭—羊草的协同修复模式效果较生物炭—星星草更好,有利于更好地构建土壤理化改良—植物生理稳态调节—生态系统相协调的人工草地建植模式。

4 结论

首年添加生物炭对盐碱土壤物理性质的改良有限,但次年 T_1 处理下土壤pH和电导率降至最低,含水量、孔隙度随生物炭添加量的递增持续升高,土壤容重则持续下降。生物炭可以通过离子交换显著降低土壤 Na^+ 含量(T_1 处理两年均提高 Ca^{2+} 含量, T_2 处理下首年种植星星草时 Mg^{2+} 含量降低,次年显著升高),且羊草交换效果较好,同时 NH_4^+-N 、 $NO_3^- -N$ 含量次年显著增加,SAR、ESP总体呈现 T_1 处理下显著降低, T_2 波动较大,表明中剂量生物炭可加速土壤脱盐碱化。此外,生物炭通过改善土壤理化性质,显著提升羊草的叶绿素含量,同步降低脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质的含量,在土壤—植物的协同作用下,饲草产量大幅提高。但生物炭对星星草植物生理指标的影响较小,仅在 T_2 处理使饲草产量提升28.8%。因此,在中度盐碱区应优先采用生物炭—羊草协同人工草地建植模式,以高效修复盐碱草地并提升人工草地的饲草产量。

参考文献 References:

- [1] Li X J. The alkali-saline land and agricultural sustainable development of the western Songnen Plain in China. *Geographical Science*, 2000, 20(1): 51–55.
李秀军. 松嫩平原西部土地盐碱化与农业可持续发展. *地理科学*, 2000, 20(1): 51–55.
- [2] Wang S R, Huang Y X. Research progress on saline-alkali land improvement in Songnen Plain. *Soils and Crops*, 2023, 12(2): 206–217.
王世睿, 黄迎新. 松嫩平原盐碱地改良治理研究进展. *土壤与作物*, 2023, 12(2): 206–217.
- [3] Gu H B, Song Y, Pan J. Research progress of influencing factors on salinization of Songnen Plain. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(10): 16895–16898.
谷洪彪, 宋洋, 潘杰. 松嫩平原盐碱化形成影响因素研究进展. *安徽农业科学*, 2010, 38(10): 16895–16898.
- [4] Zeng Y X, Li X Q. Discussion on improvement techniques for saline-alkali land. *Agriculture of Jilin*, 2019(13): 80.
曾玉霞, 李兴强. 盐碱地改良技术探讨. *吉林农业*, 2019(13): 80.
- [5] Frenkel H, Gerstl Z, Alperovitch N. Exchange-induced dissolution of gypsum and the reclamation of sodic soils. *European Journal of Soil Science*, 1989, 40(3): 599–611.
- [6] Chen W T, Guo L Z, Yan B, *et al.* Effects of amendments on oat growth and soil physical properties in saline-alkali soils. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(5): 136–144.
陈文涛, 郭丽琢, 剡斌, 等. 改良剂对盐碱地燕麦生长及土壤物理性状的调控效应. *甘肃农业大学学报*, 2024, 59(5): 136–144.
- [7] Sun F L. Amelioration of saline-alkali land through hydraulic measures for rice cultivation. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2010(10): 30.
孙福利. 水利措施改良盐碱地种植水稻. *水利科学与寒区工程*, 2010(10): 30.
- [8] Peng Y N, Zhao T W, Liang Y, *et al.* Amelioration effects of compound microbial fertilizer application on saline-alkali soil in the Hexi Corridor. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2024, 45(3): 3–8.
彭铁楠, 赵廷伟, 梁燕, 等. 施用复合微生物菌肥对河西走廊盐碱地的改良效果. *中南农业科技*, 2024, 45(3): 3–8.
- [9] He X S, Geng Z C, She D, *et al.* Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 1–7.
何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 1–7.
- [10] Xiong C Q. Effects of fulvic acid and biochar on the improvement of soda-alkali soil and the growth of maize. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.
熊传琦. 黄腐酸和生物炭对苏打盐碱土壤改良效果和玉米生长的影响. 扬州: 扬州大学, 2024.
- [11] Qin J, Shu J, Liu J, *et al.* Study on the effects of different media and sampling method on the counting of *Eurotium cristatum* in Fuzhuan tea of Jingyang. *China Food Safety Magazine*, 2022(26): 66–68.

- 秦婧, 舒静, 刘静, 等. 不同培养基和取样方式对泾阳茯砖茶中冠突散囊菌计数的影响研究. 食品安全导刊, 2022(26): 66-68.
- [12] Jiang S G. Review on soil bulk density determination method. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(S2): 82-86, 91.
江胜国. 国内土壤容重测定方法综述. 湖北农业科学, 2019, 58(S2): 82-86, 91.
- [13] Meng Z F. Sodium adsorption ratio (SAR) for preventing secondary soil alkalization. The Journal of Shandong Agriculture and Engineering University, 1998(1): 26-28.
孟昭甫. 预防土壤次生碱化的钠吸附比指标. 山东农业工程学院学报, 1998(1): 26-28.
- [14] National Forestry Administration of the People's Republic of China, Forest Soil Research Laboratory, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry. Calculation of soil alkalization degree: LY/T 1249-1999. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999.
中华人民共和国国家林业局, 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. 土壤碱化度的计算: LY/T 1249-1999. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [15] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil-Determination of dry matter and water content-Gravimetric method: HJ 613-2011. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
中华人民共和国环境保护部. 土壤 干物质和水分的测定 重量法: HJ 613-2011. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [16] Li H K, Dong X L. Analysis of soil bulk density at the soil moisture station in Dianshang Village. The Farmers Consultant, 2021(3): 47, 60.
李海宽, 董小丽. 店上村墒情站土壤容重的测定分析. 农业科技创新, 2021(3): 47, 60.
- [17] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil quality-Determination of available phosphorus-Sodium hydrogen carbonate solution-Mo-Sb anti spectrophotometric method: HJ 704-2014. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.
中华人民共和国环境保护部. 土壤 有效磷的测定 碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法: HJ 704-2014. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [18] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Determination of soil organic carbon potassium dichromate oxidation-spectrophotometric method: HJ 615-2011. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
中华人民共和国环境保护部. 土壤 有机碳的测定 重铬酸钾氧化-分光光度法: HJ 615-2011. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [19] National Technical Committee on Soil Quality of Standardization Administration of China (SAC/TC 404). Soil quality-Determination of nitrate, nitrite and ammonium in soils-Extraction with potassium chloride solution and determination using automated method with segmented flow analysis: GB/T 42485-2023. Beijing: China Standards Press, 2023.
全国土壤质量标准化技术委员会(SAC/TC 404). 土壤质量 土壤硝态氮、亚硝态氮和铵态氮的测定 氯化钾溶液浸提手工分析法: GB/T 42485-2023. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [20] Zhang Q, Wei Z W, Yan T F. Correlation and path analysis of oat seed yield with agronomic characters in Jiang-Huai area. Crops, 2021(5): 146-152.
张琦, 魏臻武, 闫天芳. 江淮地区燕麦籽粒产量与农艺性状的相关性及通径分析. 作物杂志, 2021(5): 146-152.
- [21] Liu Q S, Jia Y L, Xiao Y, et al. Study on the adaptability evaluation of feeding oats in the eastern plain of Hebei Province. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2022(3): 102-106.
刘青松, 贾艳丽, 肖宇, 等. 河北东部平原区饲用燕麦适应性评价研究. 黑龙江畜牧兽医, 2022(3): 102-106.
- [22] Lu C H. Study on drought resistance and evaluation on turf use quality of eight wild annual bluegrass. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010.
鲁存海. 8种野生早熟禾抗旱性及草坪质量综合评价研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [23] Wystalska K, Kwarcia-Kozłowska A, Włodarczyk R. Influence of technical parameters of the pyrolysis process on the surface area, porosity, and hydrophobicity of biochar from sunflower husk pellet. Sustainability, 2023, 15(1): 394.
- [24] Kammann C I, Linsel S, Göbbling J W, et al. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations. Plant and Soil, 2011, 345(1/2): 195-210.
- [25] Aitken R L, Moody P W. The effect of valence and ionic-strength on the measurement of pH buffer capacity. Soil Research, 1994, 32(5): 975-984.
- [26] Gliniak M, Sikora J, Sadowska U, et al. Impact of biochar on soil water content and electrical conductivity. Institute of Physics Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 362: 012044.

- [27] Fidel R B, Laird D A, Thompson M L, *et al.* Characterization and quantification of biochar alkalinity. *Chemosphere*, 2017, 167: 367–373.
- [28] Ma W M, Ma L, Jiao J T, *et al.* Impact of straw incorporation on the physicochemical profile and fungal ecology of saline-alkaline soil. *Microorganisms*, 2024, 12(2): 277.
- [29] ELsaman N K, Amin A E A Z, El-Razek M A, *et al.* Comparative effects of different types and doses of biochar on soil quality indicators and arugula growth under saline conditions. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 10046.
- [30] Sun H J, Zhang H C, Shi W M, *et al.* Effect of biochar on nitrogen use efficiency, grain yield and amino acid content of wheat cultivated on saline soil. *Plant Soil and Environment*, 2019, 65(2): 83–89.
- [31] Liu B Y, Dai Y S, Cheng X, *et al.* Straw mulch improves soil carbon and nitrogen cycle by mediating microbial community structure and function in the maize field. *Frontiers in Microbiology*, 2023(14): 1217966.
- [32] Yao Y, Gao B, Zhang M, *et al.* Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467–1471.
- [33] Wang S B, Gao P L, Zhang Q W, *et al.* Application of biochar and organic fertilizer to saline-alkali soil in the Yellow River Delta: Effects on soil water, salinity, nutrients, and maize yield. *Soil Use and Management*, 2022: 38(4): 1679–1692.
- [34] Abo-Elyousr K A M, Mousa M A A, Ibrahim O H M, *et al.* Calcium-rich biochar stimulates salt resistance in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) plants by improving soil quality and enhancing the antioxidant defense. *Plants*, 2022, 11(10): 1301.
- [35] Burrell L D, Zehetner F, Rampazzo N, *et al.* Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 2016(282): 96–102.
- [36] Yang S H. Effects of different vegetations on soil micro-food web characteristics in the Songnen Plain Wetland. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.
杨舒涵. 松嫩平原湿地不同植被类型对土壤微食物网结构和特征的影响. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- [37] Hua L, Jin S S, Luo J J. Effect of Bio-char on the micro-environment characteristics and humus in soil. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(11): 1795–1799.
花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究. 生态环境学报, 2012, 21(11): 1795–1799.
- [38] Amin A E A Z. Effects of saline water on soil properties and red radish growth in saline soil as a function of co-applying wood chips biochar with chemical fertilizers. *BMC Plant Biology*, 2023, 23(1): 382.
- [39] Deng X Y, Tang F L, Zhu R F, *et al.* Determination and optimization of cultivation for phosphorus-solubilizing capacity in rhizosphere of *Leymus chinensis* and *Puccinellia tenuiflora* in Songnen Grassland. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2017(5): 158–161.
邓小宇, 唐凤兰, 朱瑞芬, 等. 松嫩草地羊草和星星草根际溶磷能力测定及优化培养. 黑龙江畜牧兽医, 2017(5): 158–161.
- [40] Anjum S A, Xie X Y, Wang L C, *et al.* Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(9): 2026–2032.
- [41] Liu J X, Sun P, Zhao X Y, *et al.* Regulation of antioxidant metabolic pathways in ryegrass by biochar and arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress. *Periodical of Ocean University of China*, 2025, 55(4): 81–89.
刘佳鑫, 孙萍, 赵新月, 等. 盐胁迫下生物炭和丛枝菌根真菌对黑麦草抗氧化代谢路径的调节作用. 中国海洋大学学报, 2025, 55(4): 81–89.
- [42] Murtaza G, Rizwan M, Usman M, *et al.* Biochar enhances the growth and physiological characteristics of *Medicago sativa*, *Amaranthus caudatus* and *Zea mays* in saline soils. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 304.
- [43] Johnson J M, Ibrahim A, Dossou-Yovo E R, *et al.* Inorganic fertilizer use and its association with rice yield gaps in sub-Saharan Africa. *Global Food Security-agriculture Policy Economics and Environment*, 2023(38): 100708.