

Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 对翅碱蓬种子萌发及幼苗渗透调节物质的影响

赵玥茹¹, 蔡恒江^{1,2*}, 张靖凡¹, 陈文翰¹, 刘远^{1,2}, 陈森¹

(1. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁大连 116023; 2. 辽宁省高校近岸海洋环境科学与技术重点实验室, 辽宁大连 116023)

摘要 [目的]探讨重金属胁迫对翅碱蓬种子萌发及幼苗的影响。[方法]利用不同梯度的 Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 溶液进行水培试验,测定翅碱蓬种子萌发和幼苗渗透调节物质含量的变化。[结果]翅碱蓬种子的总发芽率和萌发速率在较低浓度(50 mg/L)Cu²⁺胁迫下会上升,而在较高浓度(100, 200 mg/L)Cu²⁺胁迫下会下降;Zn²⁺胁迫对种子的总发芽率和萌发速率均会产生明显的抑制。Cu²⁺和 Zn²⁺胁迫会使幼苗可溶性蛋白、可溶性糖和游离脯氨酸含量明显升高。[结论]Cu²⁺和 Zn²⁺胁迫会影响翅碱蓬种子的萌发,导致幼苗的渗透调节物质升高。

关键词 翅碱蓬;重金属;种子萌发;渗透调节物质

中图分类号 Q945.78 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)15-0045-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.15.014



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Cu²⁺ and Zn²⁺ on Seed Germination, Osmotic Adjustment Substances in Seedling of *Suaeda heteroptera* Kitagawa

ZHAO Yue-ru¹, CAI Heng-jiang^{1,2}, ZHANG Jing-fan¹ et al (1. College of Marine Technology and Environment, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023; 2. Key Laboratory of Nearshore Marine Environmental Science and Technology of Liaoning Provinces University, Dalian, Liaoning 116023)

Abstract [Objective] The effects of heavy metal stress on seed germination and seedlings of *Suaeda heteroptera* were studied. [Method] The changes of seed germination and osmotic adjustment substances in seedling were measured under different gradients of Cu²⁺ and Zn²⁺ solutions by water culture test. [Result] The total germination percent and germination rate of *S. heteroptera* seeds were increased under low Cu²⁺ concentration (50 mg/L), but decreased under higher Cu²⁺ concentration (100, 200 mg/L). Zn²⁺ stress could inhibit the total germination percent and germination rate of *S. heteroptera* seeds. The contents of soluble protein, soluble sugar and free proline in seedlings were increased under Cu²⁺ and Zn²⁺ stress. [Conclusion] Cu²⁺ and Zn²⁺ could affect the germination of *S. heteroptera* seeds and increased osmotic adjustment substances of *S. heteroptera* seedlings.

Key words *Suaeda heteroptera* Kitagawa; Heavy metal; Seed germination; Osmotic adjustment substances

河口湿地是河水与海水相遇并混合的区域,在环境调控、维持生态系统平衡和保障生态系统可持续发展中起着无法替代的作用^[1]。然而,陆源污染物也会大量输入汇集于此,污染相对严重。在这些污染物中,重金属具有来源广、难降解、易富集等特征,对生态系统健康存在较大负面影响^[2-3]。辽河口湿地位于辽河、大辽河入海口交汇处,受重金属污染较为严重。研究表明,Cu、Zn这2种元素在辽河口湿地沉积物中含量较高,最高分别可达108.2、207.7 μg/g^[4]。

翅碱蓬(*Suaeda heteroptera* Kitagawa)是藜科碱蓬属一年生草本植物,它耐盐、耐淹,是辽河口湿地最为典型的湿地滩涂植被。近年来,翅碱蓬出现了不明原因的大面积死亡,湿地滩涂大面积退化裸露,生物多样性锐减,对湿地生态系统造成了严重的威胁^[5-6]。翅碱蓬死亡原因较为复杂,其中重金属污染会对其生长产生影响^[7],是死亡的潜在原因之一。研究表明,在重金属胁迫下,植物体内的生理生化代谢会发生紊乱,导致植物抗性降低,严重时造成植株死亡^[8]。以翅碱蓬为材料,研究重金属Cu²⁺和Zn²⁺胁迫对翅碱蓬种子萌发及幼苗渗透调节物质的影响,为探寻湿地退化原因和机理提供参考。

1 材料与与方法

1.1 翅碱蓬种子及药品 试验所用翅碱蓬种子采集于辽河

基金项目 国家自然科学基金项目(41306104);盘锦红海滩湿地退化及生态修复项目(PHL-XZ-2017013-002)。

作者简介 赵玥茹(1991—),女,辽宁本溪人,硕士研究生,研究方向:海洋生态学。*通信作者,副教授,从事海洋生态学 research。

收稿日期 2019-03-12

口湿地。挑选饱满的种子放入10% NaClO溶液中浸泡15 min后用蒸馏水淋洗,风干后进行试验。

CuSO₄和ZnSO₄溶于蒸馏水中分别配制成1.00 g/L的Cu²⁺和Zn²⁺母液,用时逐级进行稀释。

1.2 方法 试验在底部铺有3层纱布的500 mL烧杯中进行,取50粒翅碱蓬种子均匀置于烧杯的底部,再加入20 mL不同浓度梯度重金属溶液后用封口膜密封烧杯进行水培试验。Cu²⁺和Zn²⁺浓度梯度为0(对照)、50、100、200 mg/L,试验设5个平行样,共进行7 d,培养温度为(25±1)℃,光照强度1500 lx,光暗周期12 h:12 h。

1.3 种子萌发的测定 每天记录种子的发芽数,胚根突破种皮1 mm视为发芽。

总发芽率=发芽数/50×100%;萌发速率= $N_1 \times 1 + (N_2 - N_1) \times 1/2 + (N_3 - N_2) \times 1/3 + \dots + (N_n - N_{n-1}) \times 1/n$,式中, N 为第1,2,⋯, n 天发芽种子的百分率^[9]。

1.4 渗透调节物质含量的测定 试验进行7 d后,用镊子把幼苗轻轻夹出,放入蒸馏水中漂洗,并用滤纸轻轻吸干后进行渗透调节物质含量的测定。可溶性蛋白含量参照Bradford的方法测定^[10];可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[11];游离脯氨酸含量采用茚三酮比色法测定^[12]。

1.5 数据处理 采用SPSS 11.0进行数据处理及统计分析,用One-way ANOVA进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 Cu²⁺和Zn²⁺对翅碱蓬种子萌发的影响 从图1可以看出,当Cu²⁺浓度较低(50 mg/L)时,翅碱蓬种子总发芽率升

高,但并不明显($P>0.05$);当 Cu^{2+} 浓度较高(100、200 mg/L)时,翅碱蓬种子总发芽率会明显降低($P<0.05$),分别较对照降低了8.32个百分点和17.22个百分点。从图2可以看出, Zn^{2+} 会使翅碱蓬种子总发芽率明显降低($P<0.05$),随着 Zn^{2+} 浓度升高,总发芽率降低得愈加明显, Zn^{2+} 浓度分别为50、100、200 mg/L时,翅碱蓬种子总发芽率分别降低了11.32百分点、15.02百分点和26.42百分点。

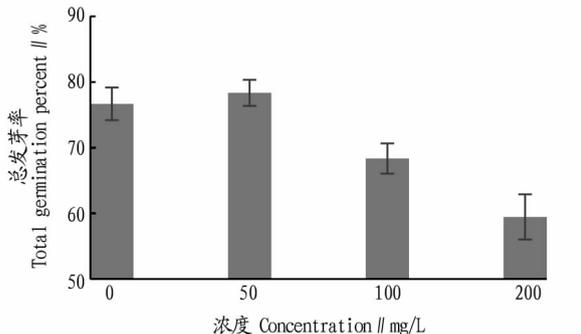


图1 Cu^{2+} 对翅碱蓬种子总发芽率的影响

Fig. 1 Effects of Cu^{2+} on total germination percent of *S. heteroptera* seeds

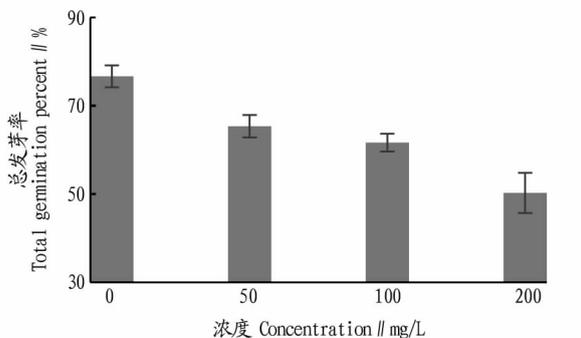


图2 Zn^{2+} 对翅碱蓬种子总发芽率的影响

Fig. 2 Effects of Zn^{2+} on total germination percent of *S. heteroptera* seeds

从图3可以看出,较低浓度(50 mg/L)的 Cu^{2+} 会使种子萌发速率上升,而较高浓度(100、200 mg/L)的 Cu^{2+} 会使种子萌发速率下降。当 Cu^{2+} 浓度为200 mg/L时,种子萌发速率显著下降($P<0.05$),降低了28.28%。从图4可以看出, Zn^{2+} 也会使翅碱蓬种子萌发速率降低,当 Zn^{2+} 浓度为200 mg/L时,种子萌发速率明显下降($P<0.05$),降低了39.24%。

2.2 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对翅碱蓬幼苗可溶性蛋白含量的影响 从图5、6可以看出, Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对翅碱蓬幼苗可溶性蛋白含量有明显的影 响,幼苗可溶性蛋白含量会有不同程度的升高。 Cu^{2+} 浓度为50、100、200 mg/L时,幼苗可溶性蛋白含量分别升高了2.24%、6.49%和6.85%; Zn^{2+} 浓度为50、100、200 mg/L时,幼苗可溶性蛋白含量分别升高了3.71%、5.72%和4.88%。可溶性蛋白是植物重要的渗透调节物质之一,重金属能够促进络合蛋白的产生,降低对植物的毒害,这可能是植物抵抗重金属胁迫的一种解毒机制^[12]。

2.3 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对翅碱蓬幼苗可溶性糖含量的影响 从图7、8可以看出, Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 会使翅碱蓬幼苗可溶性糖含量升

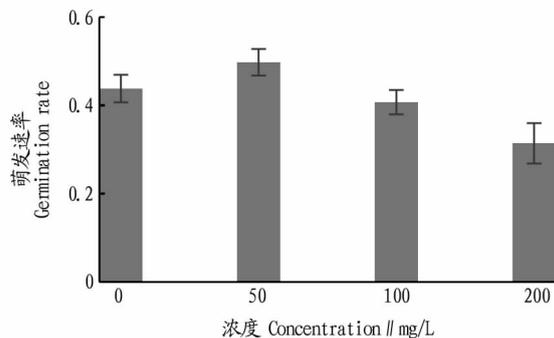


图3 Cu^{2+} 对翅碱蓬种子萌发速率的影响

Fig. 3 Effects of Cu^{2+} on germination rate of *S. heteroptera* seeds

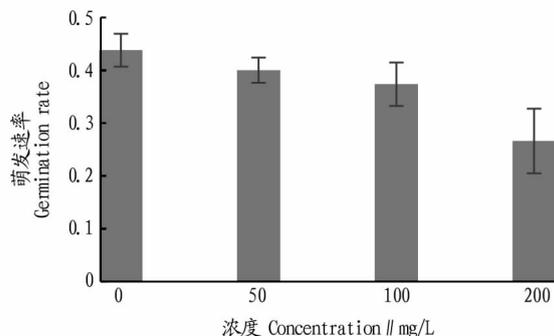


图4 Zn^{2+} 对翅碱蓬种子萌发速率的影响

Fig. 4 Effects of Zn^{2+} on germination rate of *S. heteroptera* seeds

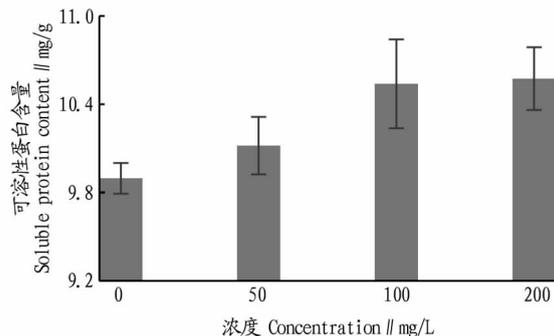


图5 Cu^{2+} 对翅碱蓬幼苗可溶性蛋白含量的影响

Fig. 5 Effects of Cu^{2+} on soluble protein content in *S. heteroptera* seedlings

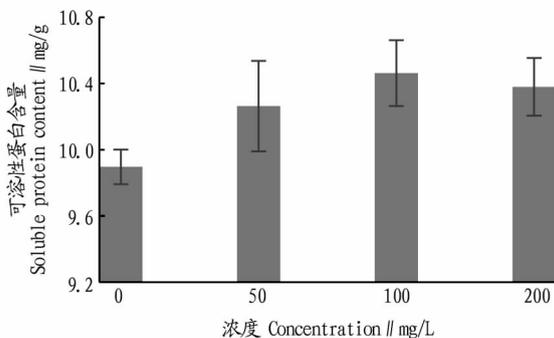


图6 Zn^{2+} 对翅碱蓬幼苗可溶性蛋白含量的影响

Fig. 6 Effects of Zn^{2+} on soluble protein content in *S. heteroptera* seedlings

高。当 Cu^{2+} 浓度为200 mg/L时,幼苗可溶性糖含量达到最

高,升高了 5.57%; Zn^{2+} 浓度为 100 mg/L 时,幼苗可溶性糖含量达到最高,升高了 6.42%。可溶性糖是植物的渗透调节物质之一,它的升高会提高幼苗对重金属胁迫的耐受能力。

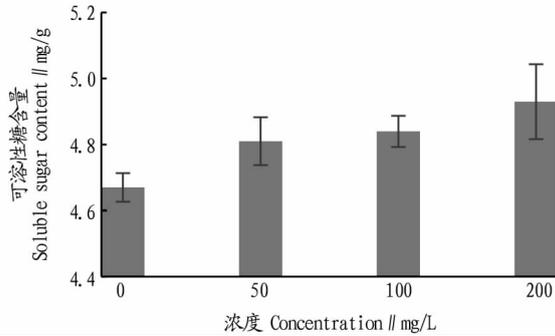


图 7 Cu^{2+} 对翅碱蓬幼苗可溶性糖含量的影响

Fig. 7 Effects of Cu^{2+} on soluble sugar content in *S. heteroptera* seedlings

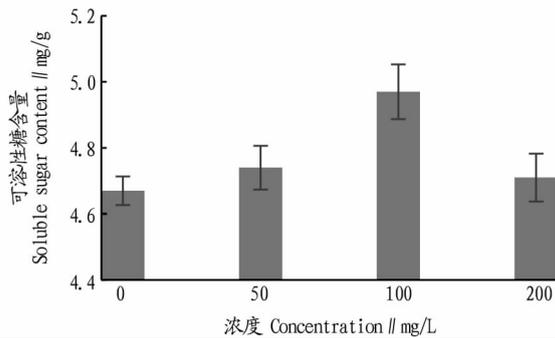


图 8 Zn^{2+} 对翅碱蓬幼苗可溶性糖含量的影响

Fig. 8 Effects of Zn^{2+} on soluble sugar content in *S. heteroptera* seedlings

2.4 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对翅碱蓬幼苗游离脯氨酸含量的影响 从图 9、10 可以看出, Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对翅碱蓬幼苗游离脯氨酸含量有明显的提升,幼苗游离脯氨酸含量会有不同程度的升高。 Cu^{2+} 浓度为 50、100、200 mg/L 时,幼苗游离脯氨酸含量分别升高了 44.10%、89.15% 和 90.91%; Zn^{2+} 浓度为 50、100、200 mg/L 时,幼苗游离脯氨酸含量分别升高了 32.51%、87.06% 和 97.45%。在重金属胁迫条件下,由于有机体的氨基酸代谢发生改变,所以植物会在体内积累大量脯氨酸^[13],从而使幼苗的抗氧化能力增强。

3 结论与讨论

较低浓度(50 mg/L)的 Cu^{2+} 会使翅碱蓬种子总萌发率和萌发速率上升,而较高浓度(100、200 mg/L)的 Cu^{2+} 会使总萌发率和萌发速率下降。在试验选择的浓度梯度条件下, Zn^{2+} 会对翅碱蓬种子总萌发率和萌发速率起到抑制作用。已有研究结果发现,低浓度重金属胁迫会促进种子的发芽,而高浓度则抑制发芽^[14],这与该试验结果相似。较低浓度 Cu^{2+} 促进翅碱蓬种子的萌发,这可能与“毒物的兴奋效应”有关^[15]。 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 使种子萌发受到抑制的原因是淀粉酶和蛋白酶的活性下降,使种子内储藏的淀粉和蛋白质的分解受到抑制,影响种子萌发所需的物质和能量,进而萌发受到抑制^[16]。

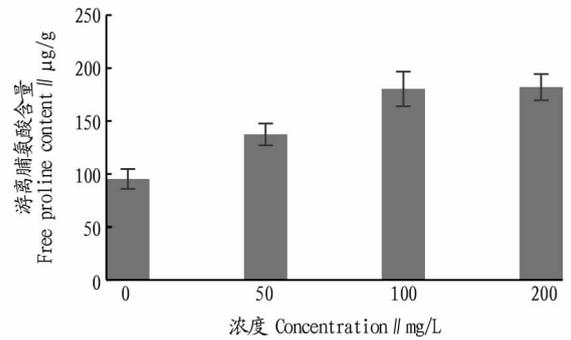


图 9 Cu^{2+} 对翅碱蓬幼苗游离脯氨酸含量的影响

Fig. 9 Effects of Cu^{2+} on free proline content in *S. heteroptera* seedlings

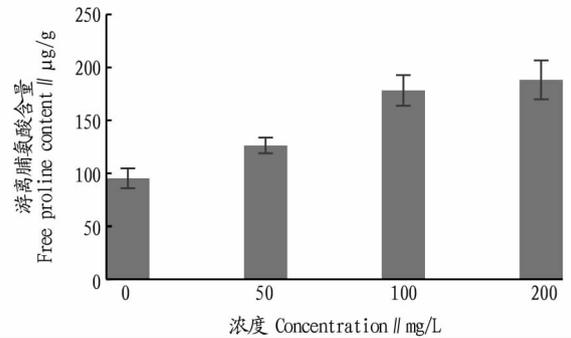


图 10 Zn^{2+} 对翅碱蓬幼苗游离脯氨酸含量的影响

Fig. 10 Effects of Zn^{2+} on free proline content in *S. heteroptera* seedlings

Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 会使翅碱蓬幼苗的渗透调节物质——可溶性蛋白、可溶性糖、游离脯氨酸含量上升。在逆境胁迫条件下,植物的渗透调节物质会不断积累,这是植物在逆境条件下得以生存的重要机制之一^[17]。受到 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 胁迫,翅碱蓬幼苗会积累可溶性蛋白、可溶性糖、游离脯氨酸,以调节细胞内的渗透平衡,间接保护那些参与新陈代谢的酶,从而增强幼苗对 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 胁迫的抵抗能力^[12]。

参考文献

- [1] 芦晓峰,张亦舒,王毅,等. 辽宁双台河口湿地各功能区中沉积物全磷的时空分布规律[J]. 沈阳农业大学学报,2015,46(6):751-756.
- [2] 张林英,徐颂军,付笛峰. 珠江河口湿地土壤重金属污染评价及空间特征分析[J]. 热带地貌,2018,39(1):20-25.
- [3] XIAO R, BAI J H, LU Q Q, et al. Fractionation, transfer, and ecological risks of heavy metals in riparian and ditch wetlands across a 100-year chronosequence of reclamation in an estuary of China[J]. Science of the total environment, 2015, 517:66-75.
- [4] 朱鸣鹤,方鹰雄,丁永生,等. 常见重金属在翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)根际沉积物系统季节迁移变化[J]. 海洋与湖泊,2010,41(5):784-790.
- [5] 台培东,苏丹,刘延斌,等. 双台子河口自然保护区红海滩景观退化机制研究[J]. 环境污染与防治,2009,31(1):17-20.
- [6] 陈文翰,蔡恒江,赵玥茹,等. 盐胁迫对翅碱蓬种子萌发及幼苗渗透调节物质的影响[J]. 安徽农业科学,2018,46(16):65-67.
- [7] 何洁,高钰婷,贺鑫,等. 重金属 Zn 和 Cd 对翅碱蓬生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 环境科学学报,2013,33(1):312-320.
- [8] 张义贤,张丽萍. 重金属对大麦幼苗膜脂过氧化及脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4):857-860.
- [9] GREENWOOD M E, MACFARLANE G R. Effects of salinity and temperature on the germination of *Phragmites australis*, *Juncus kraussii*, and *Juncus acutus*: Implications for estuarine restoration initiatives [J]. Wetlands, 2006, 26(3):854-861.

速率^[20],不利于有机质的表层积累,而翻耕疏松的土壤利于作物根系下扎,有更多的作物根系分布到较深土层中,更多的有机物质投入是翻耕在较深土层(20~40 cm)中全氮含量更高的主要原因,与田慎重等^[19]研究结果一致。秸秆还田显著提高了土壤全量态养分含量,免耕覆盖还田时全量态养分表层积累,翻耕秸秆还田时全量态养分积累深度相对较深,但积累量较少^[21]。

不同土壤物理性质及pH条件亦影响土壤全量态养分向速效养分的转化,导致土壤速效养分的剖面分布差异^[22]。各处理土壤碱解氮、土壤有效磷和土壤速效钾含量随土壤深度增加逐渐减少,翻耕秸秆还田更有利于表层土壤碱解氮、土壤有效磷和土壤速效钾的增加,这可能与秸秆中养分的释放率有关(钾>磷>碳>氮)^[4]。各处理土壤硝态氮的剖面分布明显不同,免耕土壤中存有大量大孔隙,而且延伸较深,利于雨水下渗^[23],研究区夏季多雨的特征,导致土壤中硝态氮向下淋失,因此0~20 cm土层硝态氮含量较低,而20~60 cm土层硝态氮含量较高,而秸秆还田处理的硝态氮含量明显低于无秸秆还田处理,可能与秸秆还田时微生物的大量繁殖消耗了土壤中的氮,且秸秆还田提高了作物对硝态氮的吸收利用率^[24],而秸秆中氮释放缓慢不能补足有效氮损失有关。

对不同耕作方式和秸秆还田处理影响下的作物产量分析表明,免耕、翻耕秸秆还田均有利于作物增产,其中翻耕秸秆还田模式下作物产量达到最高,这与研究中发现的翻耕秸秆还田模式下0~20 cm速效养分含量最高具有显著相关关系。

4 结论

在淮北潮土麦玉轮作区,秸秆还田能提高玉米产量和土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾等含量,连续2年定位试验后显著改善了土壤肥力水平,但不同耕作方式下秸秆还田对玉米产量和土壤剖面养分分布的影响存在差异。与免耕、翻耕秸秆不还田处理相比免耕、翻耕秸秆还田处理玉米产量分别增加15.58%和2.71%;免耕秸秆还田处理较翻耕秸秆还田处理更好地提高了表层土壤有机质、全氮含量,增加了剖面20~60 cm土层速效养分的含量;而翻耕秸秆还田处理更有利于表层土壤碱解氮、土壤有效磷和土壤速效钾等速效态养分的增加,以及剖面20~60 cm土层土壤有机质、全量态养分的积累。综合以上指标以及淮北潮土区的降雨特征,虽然翻耕模式下秸秆还田处理作物产量效应最好,但是并不利于土壤养分的积累,不利于土壤可持续生产力;免耕秸秆还田在提高剖面土壤肥力的同时,减少了养分在土体中的淋失,并保证了稳定的作物产量,可获得更好的经济与环境效应。

(上接第47页)

- [10] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical biochemistry*, 1976, 72: 248-254.
- [11] 王三根. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [12] 李德生, 何安, 彭玲, 等. 重金属对日本櫟木内渗透调节物质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(1): 101-104.
- [13] 徐超. 脯氨酸与重金属耐性和富集的研究进展[J]. *中国资源综合利用*, 2018, 36(2): 80-83.

参考文献

- [1] WRIGHT A L, DOU F G, HONS F M. Soil organic C and N distribution for wheat cropping systems after 20 years of conservation tillage in central Texas[J]. *Agr Ecosys Environ*, 2007, 121(4): 376-382.
- [2] REICOSKY D C, SAUER T J, HATFIELD J L. Challenging balance between productivity and environmental quality: Tillage impacts[M]//HATFIELD J L, SAUER T J. *Soil management: Building a stable base for agriculture*. Madison: Soil Science Society of America, 2011: 13-73.
- [3] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(3): 297-302.
- [4] 田平, 姜英, 孙悦, 等. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(1): 100-108.
- [5] ZHANG P, CHEN X L, WEI T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. *Soil Till Res*, 2016, 160: 65-72.
- [6] 朱敏, 石云翔, 孙志友, 等. 秸秆还田与旋耕对川中土壤物理性状及玉米机播质量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(7): 1025-1033.
- [7] 黄界颖, 阮仁杰, 王擎运, 等. 不同耕作模式下秸秆还田对潮土肥力特征的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(4): 664-669.
- [8] 邓智慧. 秸秆还田与耕作方式对土壤性状及玉米产量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [9] 李玉梅, 王根林, 孟祥海, 等. 不同耕作方式对土壤水分和养分变化的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2018, 49(9): 54-60.
- [10] SOANE B D, BALL B C, ARVIDSSON J, et al. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment[J]. *Soil Tillage Res*, 2012, 118: 66-87.
- [11] 陈文超, 徐生, 朱安宁, 等. 保护性耕作对潮土碳、氮含量的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(9): 224-230.
- [12] 成臣, 汪建军, 程慧煌, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 247-257.
- [13] 闫洪奎, 王欣然. 长期定位试验下秸秆还田配套深松对土壤性状及玉米产量的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(S1): 250-255.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 15-113.
- [15] BOTTINELLI N, ANGERS D A, HALLAIRE V. Tillage and fertilization practices affect soil aggregate stability in a Humic Cambisol of Northwest France[J]. *Soil Tillage Res*, 2017, 170: 14-17.
- [16] MARTÍNEZ I, CHERVET A, WEISSKOPF P, et al. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment; Part II. Soil porosity and gas transport parameters[J]. *Soil Tillage Res*, 2016, 163: 130-140.
- [17] 刘义国, 刘永红, 刘洪军, 等. 秸秆还田量对土壤理化性状及小麦产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(3): 131-135.
- [18] 卢佳, 邹洪涛, 刘峰, 等. 土层置换对土壤物理性质及养分有效性的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46(5): 1216-1220.
- [19] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 373-378.
- [20] SHU R, DANG F, ZHONG H. Effects of incorporating differently-treated rice straw on phytoavailability of methylmercury in soil[J]. *Chemosphere*, 2016, 145: 457-463.
- [21] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 81-85.
- [22] TONG X G, XU M G, WANG X J, et al. Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. *Catena*, 2014, 113: 251-259.
- [23] 李新举, 张志国, 赵美兰, 等. 免耕对土壤养分的影响[J]. *土壤通报*, 2000, 31(6): 267-269.
- [24] 赵鹏, 陈卓. 豫北秸秆还田配施氮肥对冬小麦氮利用及土壤硝态氮的短期效应[J]. *中国农业大学学报*, 2008, 13(4): 19-23.

- [14] 鱼小军, 张健文, 潘涛涛, 等. 铜、镉、铅对7种豆科牧草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *草地学报*, 2015, 23(4): 793-803.
- [15] 顾晓军, 田素芬. 毒物兴奋效应概念及其生物学意义[J]. *毒理学杂志*, 2007, 21(5): 425-428.
- [16] 梁芳, 郭晋平. 植物重金属毒害作用机理研究进展[J]. *山西农业科学*, 2007, 35(11): 59-61.
- [17] 王娟, 李德全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢[J]. *植物学通报*, 2001, 18(4): 459-465.