虎尾草生物学和生态学特性研究进展

罗　珍

（西藏自治区农牧科学院草业科学研究所，西藏 拉萨 850000）

摘　要：系统综述了近年来关于虎尾草的生物学特性，包括形态结构、分类学地位和生态学特性，以及耐盐碱、抗旱及对重金属胁迫响应的研究进展，剖析了虎尾草在根系分泌有机酸调节根际pH、离子区域化及抗氧化防御等方面的核心耐盐碱机制。同时，综述了虎尾草作为先锋植物在盐碱化草地修复、矿区生态恢复等实践中的应用成效与局限性，并对其未来的研究方向进行了展望，旨在为深入理解该物种的生态适应策略及拓展其在特殊生境中的修复应用提供理论参考。

关键词：虎尾草；生态学特性；耐盐碱机制；生态修复；研究进展

中图分类号：S812.4　　**文献标识码**：C

Research advances on biological and ecological characteristics of *Chloris virgata Sw.*

Luo Zhen

(Institute of Pratacultural Science, Xizang Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa Xizang 850000, China)

Abstract: This paper systematically summarizes recent research on morphological taxonomy, biological traits, salt-alkali resistance, drought tolerance and heavy metal response of *Chloris virgata*. Its core saline-alkali adaptation mechanisms including root organic acid secretion, ion compartmentation and antioxidant system are analyzed. The paper also discusses the application effects and limitations of *C. virgata* as pioneer species in saline grassland and mine ecological restoration, and proposes future research directions, providing theoretical reference for its adaptive mechanism research and habitat restoration utilization.

Key words: *Chloris virgata* Sw.; ecological characteristics; saline－alkali tolerance mechanism; ecological restoration; research progress

虎尾草 *Chloris virgata* Sw.是禾本科虎尾草属丛生型一年生草本植物，具有C_4光合途径、繁殖力强、生育期短等特点，其产量高，草质柔软，适口性好，被认为是一种有发展前途的牧草[1]。该草是建植人工草地和改良盐碱化草地的伴生草种，在退化草地、盐碱草甸广泛分布，是盐碱地[2]、矿区废弃地[3]、滨水地[4]等困难立地条件下的先锋种和优势种，展示出强大的拓荒与定居能力。虎尾草主要采取一年生草本植物“机会主义”生活史策略[5]。面对环境胁迫，虎尾草进行资源再分配，调整自身营养生长和生殖生长的比例分配，优先保障种子的生产与成熟[6]，从而确保种群在时间上的延续性与空间上的扩散潜力，这种以种子为中心的生存逻辑，使其能够凭借高繁殖输出、强大的种子扩散能力及对萌发时机的灵活调控，迅速入侵并占据受干扰的生境[7]。在全球气候变暖和极端干旱事件频发的背景下，C_4植物的分布格局也发生微妙变化。研究表明，虎尾草作为典型的C_4一年生草本，已表现出向更冷季节扩张的生态适应性，其在全年各季节均能完成萌发、生长与繁殖过程[8]，这种潜在的分布区扩展，既可能为退化生态系统的自然恢复提供新的种源支撑，也可能对现有植被格局和生态功能产生不可预知的影响。因此，系统梳理虎尾草的生物学与生态学特性，对于预测其种群动态、评估生态效应及合理开发利用这一物

收稿日期：2026－01－21

基金项目：“三耐两能”牧草新品种选育与配套关键技术研究项目（XZ202502ZY0009）。

作者简介：罗珍（1995—），女，硕士，研究实习员，主要从事草地生态方面的工作，E-mail：3030960050@qq.com。

种资源具有重要的理论价值和现实意义。本文旨在从这一理论视角出发，系统综述虎尾草生物学与生态学特性方面的研究进展，并据此评估其在生态修复实践中的应用价值与未来研究方向。

1 虎尾草的分类学与系统发育

虎尾草由瑞典植物学家奥洛夫·斯瓦茨于1797年以西印度群岛安提瓜岛采集的标本正式描述并命名[9]。其形态学上的一个关键识别特征是数枚穗状花序在秆顶呈指状簇生排列，形似虎尾或刷子，其中文俗名便来源于此[10]。虎尾草的地理分布极为广泛，在两半球的热带、亚热带延伸至温带地区均有记录。在我国境内，其分布几乎遍及所有省区[11]，显示出对多个不同气候类型的强大适应能力，表明该物种在生理与生活史策略上具有高度的可塑性，为其在多种退化生态系统中扮演先锋植物角色奠定了地理与生物学基础。

虎尾草属 *Chloris* 由 Robert Brown 于1810年正式建立，模式种为 *Chloris cruciata*(L.)Sw.。该属全球约含55～60种，主要分布于热带和亚热带地区，少数种类延伸至暖温带。中国记载虎尾草属植物有虎尾草 *C.virgata*、非洲虎尾草 *C.gayana*、孟仁草 *C.barbata* 等，主要分布于长江流域以南及北方农牧交错带[12]。近年来，分子系统学的发展即基于核基因 ITS 和叶绿体基因片段(如 *rbcL*、*trnL-F*)的系统发育分析，为虎尾草属的系统发育重建提供了新的证据。然而，虎尾草属内部种间的系统发育关系仍有待基于更广泛的取样和多位点序列数据加以进一步解析，部分形态上相似的近缘种如*C.virgata*与 *C.barbata* 之间的遗传分化和物种界限尚需深入研究。

2 虎尾草的抗逆性

2.1 虎尾草的抗旱性

虎尾草的抗旱性与水分利用策略呈现出多维度、高度可塑的特点[13]。虎尾草在种子萌发期对水分胁迫最为敏感，胚根伸长受抑制程度大于胚芽；而幼苗期具有较强的水分胁迫耐受性，能够通过调整根冠比和渗透调节来维持基本生长；进入生殖生长阶段后，虎尾草将抗旱策略转向“繁殖保障”模式，在有限的水分条件下优先保障穗分化和种子灌浆[13]。这种生育阶段依赖性的抗旱策略调整是虎尾草将有限资源最大化转化为繁殖输出的关键适应机制。从生理角度来看，虎尾草在干旱胁迫下启动生理防御机制，随着干旱胁迫加剧，虎尾草叶片水势降低，导致恢复水分平衡功能受阻，转而通过积累丙二醛、脯氨酸等渗透调节物质，提升超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶活性来维持细胞稳定[14]。还有研究表明，作为一年生植物的虎尾草与多年生植物羊草[15]不同，在干旱胁迫下，虎尾草通过 C_4 光合途径的高效性采取“适应”或“规避”的方式来应对。从形态与生长策略来看，虎尾草通过稳定根冠比、比叶面积与气孔密度、生育期长度、生殖分配比例及提高果重比等多种方式优先保障种子生产，形成“繁殖优先”的适应特征[16]。在种子萌发层面，虎尾草表现出明显的生境适应性分化。在阿拉善荒漠地区，种群通过休眠后熟避开极端干旱；而在温带半干旱地区，种群则利用短暂降水期以高萌发率快速萌发，干旱胁迫解除后复萌能力较强[17]。综合以上表明，虎尾草通过生理调节、繁殖策略与形态可塑性的综合适配，在不同干旱生境中形成了特定的适应机制，为其种群延续与分布提供了关键支撑。

2.2 虎尾草的抗盐碱性

虎尾草对盐碱胁迫具有显著的抗性，这种抗性是建立在其生理与代谢调节基础之上的。盐胁迫通常会带来严重的离子和渗透胁迫，这会导致植物的生长和生理进程受到影响[18]。相关研究发现，NaCl 胁迫会显著抑制虎尾草种子萌发率、延迟萌发进程，抑制胚芽与胚根的早期生长，这与多数非盐生植物的响应一致，当盐胁迫解除，如遇降水稀释，种子能迅速恢复高萌发率[19]。从生理角度分析，虎尾草幼苗能够通过积累大量脯氨酸作为主要的渗透调节剂，同时增加可溶性糖和可溶性蛋白的含量，以协同维持细胞渗透势与水分平衡，保护细胞结构与功能，使虎尾草叶片含水量在盐渍环境中得以保持相对稳定，构成了其抵御盐分渗透胁迫的第一道内在防线[20]。然而，碱化环境对植物的伤害作用除了渗透胁迫和离子毒害外还涉及高 pH 直接引起的物理伤害和间接造成的营养胁迫，碱化环境不仅降低虎尾草茎叶、穗和根的生物量，同时抑制叶片的光合作用，降低虎尾草的水分利用效率，导致虎尾草叶片光合作用积累有机物的能力降低，进而影响虎尾草生物量的积累[21]。在光合生理层面，盐

碱胁迫对虎尾草的光合系统造成多方面的损害。研究表明，随着盐碱浓度的升高，虎尾草的净光合速率（*Pn*）、气孔导度（*Gs*）和蒸腾速率（*Tr*）均呈下降趋势，但胞间 CO_2 浓度（*Ci*）的变化趋势则因胁迫类型而异。在 NaCl 胁迫下，*Ci* 随盐浓度升高而上升，表明光合下降的主要原因由气孔限制转向非气孔限制（即叶肉细胞光合活性的损伤）；而在 Na_2CO_3 胁迫下，气孔限制在整个胁迫过程中均占主导地位[21]。这种光合抑制机制的差异反映了虎尾草对中性盐和碱性盐胁迫采取不同的生理应对策略。在分子层面，虎尾草耐盐碱相关基因的挖掘取得初步进展，有研究通过 cDNA 文库构建与差异筛选技术从虎尾草中鉴定出多个与盐碱胁迫响应相关的基因。该研究表明，在 NaCl 胁迫下筛选出 59 个上调表达的基因，其中 23 个同时被 $NaHCO_3$ 诱导上调，10 个基因在 NaCl、$NaHCO_3$ 及干旱 3 种胁迫下均呈上调表达，这些基因主要涉及离子转运、渗透调节物质合成及抗氧化防御系统[22]。在蛋白质水平上，碳酸盐胁迫下虎尾草叶片中共鉴定了23 个与胁迫应答相关的差异表达蛋白，其中很大部分与光合作用有关，表明光合系统的调控是虎尾草适应碱胁迫的重要环节[23]。这些基因和蛋白在盐碱胁迫下的差异表达，构成了虎尾草耐盐碱的分子调控网络的基础框架，但各基因间的协同调控机制及其在虎尾草适应盐碱环境中的具体功能，仍需通过反向遗传学手段进一步验证。

2.3　虎尾草对重金属胁迫的响应

虎尾草在多种重金属污染区域的自然植被调查中频繁出现，表现了其对复合污染生境独特的适应策略和潜在的生态修复价值。虎尾草对不同重金属胁迫的响应机制并非典型的超累积，而更多体现为耐受、规避与稳定的综合特性[24]。多项野外调查证实，虎尾草是铅锌、铁矿等多类金属矿区废弃地的常见优势植物。在云南会泽铅锌矿区，虎尾草是该区域 10 种优势草本植物之一，能够在 Cd、Pb 等复合污染土壤中成功定居并形成种群[25]。在冀中某铜矿废弃地优势植物研究中，虎尾草地下部分对铜和砷离子的富集能力较强，且在铜矿废弃地的长势表现很好，根据评估，虎尾草可作为铜、砷离子复合污染土壤的生态恢复植物[26]。在内蒙古包头某铁矿尾矿库，虎尾草是自然定居的 11 种优势植物之一，该区域土壤存在 Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、F 等多种元素的复合污染[27]。不同研究结果显示，虎尾草在特定环境条件下对不同重金属富集策略归类存在差异。包头铁矿的研究将其归类为“根部囤积型”植物，即重金属含量地下部分总体高于地上部分，将污染物固定在根部。而在山西晋南的铬渣堆场，虎尾草则表现为“Cr 规避型植物”，显示出对高浓度铬污染的一种回避适应机制[28]。这种归类差异可能与不同的污染物种类、浓度及土壤环境有关，但共同印证了虎尾草在污染生境中的生存适应能力及灵活性。虎尾草对重金属胁迫的耐受性有其生理基础，相关实验室研究显示，虎尾草种子萌发和幼苗生长对一定浓度的 Fe^{2+}、Cu^{2+}、Zn^{2+} 单一及复合胁迫均具有一定耐受性[29]，表明虎尾草有通过调节早期生长发育过程来适应重金属环境的初步能力。然而，在复杂或高强度的污染环境中，仅依赖自身耐受性可能不足以实现其生态修复功能，因此，进一步研究中发现，虎尾草与丛枝菌根真菌（AMF）形成的共生体系能够增强虎尾草对特定重金属的耐受性[30]。以重金属镉（Cd）为例，接种 AMF 能提高镉胁迫下虎尾草的生物量、根系活力、抗氧化酶（POD）活性及光合色素含量，系统性地提升虎尾草的生理抗性，AMF 还会改变 Cd 在植株体内的分配，提高植物地上部的富集系数。以上结果表明，“虎尾草-AMF”共生体通过多层次的生理协同，构建了一个比单一植物更高效的抗逆与修复功能单元，提升了虎尾草本身及“虎尾草-AMF”共生体系在重金属污染环境中的适应性和修复潜力。

3　虎尾草在生态修复中的应用与挑战

虎尾草已被尝试应用于多种退化生态系统的修复实践中，其应用模式与效果因生境而异。在松嫩平原的次生盐碱斑治理中，虎尾草是常用的先锋植物之一[31]，由于光碱斑地表条件高温、高盐且缺水，虎尾草种子很难直接萌发和定居，自然存活率相对较低，有研究通过采用“扦插玉米秸秆＋补播种子”的简易辅助措施能够极显著地改善微生境，使虎尾草存活率提升至 43.1%，并保障其完成繁殖，为后续演替提供种源[32]。在演替序列中，随着土壤条件的改善，虎尾草群落可能逐渐被羊草等多年生禾草群落所替代，后续相关研究将这一技术思路系统化，发展出“补播虎尾草与野大麦等伴生牧草＋覆盖秸秆”的复合模式已形成较为成熟的应用体系[33]。在补播牧

草及覆盖秸秆生物修复模式下，玉米秸秆覆盖起到降低地表温度、减少土壤蒸发、阻隔盐分表聚、为幼苗提供物理庇护等效应[34]，该研究在关注植物存活情况的同时，从土壤生态系统功能的恢复层面入手，表明了该模式能够有效促进区域土壤微生物活动、有机质转化等关键生态过程，有效将修复目标从植被覆盖向土壤健康与生态系统功能恢复的转变。在干旱区荒漠-绿洲过渡带、公路边坡、撂荒地等水土易流失的生境，虎尾草凭借其快速生长和种子易于扩散的特性，可作为初期水土保持和土壤改良的先锋物种。与单一补播虎尾草相比，“补播虎尾草＋野大麦＋秸秆覆盖”的复合模式表现出更优的修复效果，野大麦作为多年生根茎型禾草，其深根系能够进一步改善土壤结构，而虎尾草作为一年生先锋种，短期内实现地表覆盖、抑制盐分表聚和提供有机质输入，二者在生态位上形成互补，虎尾草利用浅层土壤水分和光照资源快速生长，野大麦则通过深根系利用深层水分和养分资源，这种“一年生＋多年生”的搭配既保证了修复初期的快速成坪效果，也为植被的长期维持和正向演替奠定了基础。在土壤酶活性方面，复合模式下的脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性显著高于对照，表明土壤生态系统功能得到有效恢复。

此外，在矿山废弃地修复中，虎尾草通常作为“辅助修复物种”而非“主力修复物种”使用。以云南会泽铅锌矿区[1]为例，在Cd污染（土壤Cd含量5～15 mg/kg）区域，虎尾草的地上部分Cd含量约为1.19～1.9 mg/kg，富集系数（植物/土壤浓度比值）约0.5～0.7，未达到超富集植物标准（富集系数＞1），但其生物量较其他自然定居植物高出2～3倍，单位面积重金属提取总量相当可观。基于物种功能互补的修复理念，可考虑采用“虎尾草＋龙葵（Cd超富集植物）＋蜈蚣草（As超富集植物）”的物种组合模式，其中，同属虎尾草属的近缘种非洲虎尾草已被证实具有发达须根和快速地表覆盖能力，在水土保持方面效果显著，龙葵和蜈蚣草则分别承担Cd和As的提取功能。研究表明，龙葵与蜈蚣草间作时两者生物量均较单作显著提升，证明二者可共存并协同修复，该组合的修复效果及种间互作机制，有待后续田间试验进一步验证。

尽管潜力巨大，但虎尾草的应用也存在局限：1）耐性极限。其对盐碱的耐受性并非最强，在极高盐碱区，竞争力可能不及碱蓬等专性盐生植物。2）一年生特性。作为一年生植物，其形成的群落稳定性较差，常需与多年生植物搭配以构建持久植被。3）潜在入侵性。作为广布种和先锋种，在引入新区域时，需评估其与当地物种的竞争关系，防范其过度扩张可能对本地生物多样性产生的潜在风险。

4 总结与展望

综上所述，虎尾草是一种生物学特性独特、生态适应性广泛的先锋植物，其C_4光合途径、高繁殖输出、种子休眠与萌发的可塑性调控及“风险分摊”的种群更新策略，共同构成了其在干旱、盐碱、重金属污染等多重生境中成功定居的生态适应框架。在生理层面，虎尾草通过渗透调节、离子区隔化、抗氧化防御、根系分泌物介导的根际微环境调控等多重机制协同应对非生物胁迫。在应用层面，以“虎尾草＋秸秆覆盖”和“虎尾草＋多年生禾草”为代表的修复模式已在松嫩平原盐碱化草地治理中取得良好成效，其在矿区废弃地植被恢复中也展现出辅助修复的潜力。

许多科研工作者对虎尾草生物学和生态学特性方面开展了大量研究，也取得了一定的成果，但是由于研究区域、研究背景、研究手段及技术水平的局限性，相关领域还有以下很多需要解决的问题。

1）借助第三代测序技术构建虎尾草高质量参考基因组，结合群体重测序和全基因组关联分析，系统解析耐盐碱、抗旱等关键抗逆性状的遗传调控网络与分子标记。目前虎尾草抗逆性研究多集中在人工控制的实验室研究，而针对复杂多变的自然生境中虎尾草的研究不够深入，将实验室控制与野外长期定位观测相结合，有望揭示虎尾草在真实环境中的综合适应策略。遗传多样性是揭示某物种的广布性和多重抗逆性进化机制的关键，也是评估其不同种群适应潜力、指导生态修复中科学种源的选择依据，同时也是预防潜在基因污染与入侵风险的必要基础。通过分子标记或群体基因组学方法，解析其自然种群的遗传结构，明确关键适应性状的遗传基础是未来亟需研究和探讨的问题。

2）在更广泛的生境梯度中开展多年、多点联合观测，结合微气候和环境因子分析，系统量化虎尾草关键功能性状对环境梯度的响应曲线和

阈值，揭示其表型可塑性的生态边界。

3）拓展除 AMF 之外的其他功能微生物类群，如固氮菌、解磷菌、根际促生菌，探究其在虎尾草抗逆与修复功能中的作用，构建多维度的共生修复体系，现有研究已证实 AMF 对虎尾草重金属耐受性的提升作用，但根际细菌、放线菌等其他微生物类群的贡献尚不清晰，值得系统探索。

4）研发虎尾草专用丸粒化种子、抗旱包衣材料及配套的低成本播种技术，提高其在极端生境中的建植成功率。同时，需进一步明确虎尾草在不同类型退化生态系统中的适宜引种边界，防范其潜在入侵风险。

参考文献：

[1] 贾慎修.中国饲草植物志(第一卷)[M].北京：农业出版社，1987：59-62.

[2] 范富，张庆国，马玉露，等.不同植被覆盖盐碱地碱化特征及养分状况 [J].草业科学，2017，34(5)：932-942.

[3] 李佳.矿区废弃地植物敏感期对水热变化及胁迫的响应特征研究 [D].阜新：辽宁工程技术大学，2022.

[4] 夏斌，刘莹，胡尚春，等.水淹胁迫对虎尾草生理指标的影响 [J].东北林业大学学报，2019，47(7)：31-36.

[5] 宋冰.荒漠绿洲过渡带沙埋和干旱胁迫对一年生草本植物的影响 [D].临汾：山西师范大学，2021.

[6] 闫建成，梁存柱，付晓玥，等.草原与荒漠一年生植物性状对降水变化的响应 [J].草业学报，2013，22(1)：68-76.

[7] 朱瑶.模拟降雨格局和播种时间对两种一年生植物物候和子代种子萌发特性的影响 [D].长春：东北师范大学，2019.

[8] Hasanfard A，Chauhan B S.. Winter expansion and emergence time effects on the phenology，growth，and fecundity of feathertop rhodes grass (chloris virgata) [J]. Agronomy，2025，15(1)：67.

[9] Chloris virgata Sw.Plants of the world online [EB/OL]. https://powo.science.kew.org/taxon/urn：lsid：ipni.org：names：396063-1.

[10] 韩广轩.黄河三角洲自然湿地高等植物图志 [M].济南：山东科学技术出版社，2020：1-206.

[11] 高宝莼.四川植物志[M].成都：四川科学技术出版社，2012.

[12] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志-第六十九卷 [M].北京：科学出版社，1990.

[13] 曾露婧，王国华.干旱及复水对荒漠绿洲过渡带一年生草本植物生长及生理特性的影响 [J].草业学报，2024，33(5)：41-57.

[14] 席璐璐，猴倩倩，王国华，等.荒漠绿洲过渡带一年生草本植物对干旱胁迫的响应 [J].生态学报，2021，41(13)：5425-5434.

[15] 刘国兵，焦德志，周婵.羊草生物学和生态学特性研究进展 [J].生态科学，2024，43(6)：193-199.

[16] 张继恩，梁存柱，付晓玥，等.阿拉善荒漠一年生植物种子萌发特性及生态适应性分析 [J].干旱区资源与环境，2009，23(2)：175-179.

[17] 刘美珍，张海敏，杨珊，等.浑善达克沙地 C3 和 C4 植物对干旱胁迫响应策略 [J].科技导报，2011，29(25)：48-53.

[18] 刘云芬，彭华，王薇薇，等.植物耐盐性生理与分子机制研究进展 [J].江苏农业科学，2019，47(12)：30-36.

[19] 刘杰，张建坤，张学政.NaCl 胁迫下虎尾草种子萌发特性的研究 [J].北方园艺，2013(21)：92-94.

[20] 李长有，许矛，郑长春，等.盐碱两种胁迫对虎尾草幼苗体内有机调节物质的影响 [J].吉林师范大学学报(自然科学版)，2009，30(3)：74-77，96.

[21] 项越，赵淑婷，吴昊，等.虎尾草不同器官矿质元素含量对碱化环境的响应 [J].草业科学，2022，39(3)：511-519.

[22] 梁涵.虎尾草 cDNA 文库中与胁迫有关基因的筛选及鉴定 [D].哈尔滨：东北林业大学，2006.

[23] 罗秋香.碳酸盐逆境下虎尾草叶片蛋白质组学研究 [D].哈尔滨：东北林业大学，2006.

[24] Sun Z，Chen J，Wang X，et al.Heavy metal accumulation in native plants at a metallurgy waste site in rural areas of northern China[J]. Ecological Engineering，2016，86：60-68.

[25] 袁鑫奇，俞乃琪，郭兆来，等.会泽铅锌矿区废弃地优势草本植物的重金属富集特征 [J].生态与农村环境学报，2022，38(3)：399-408.

[26] 魏俊杰，张妍，曹柳青，等.冀中某铜矿废弃地土壤及优势植物重金属特征评价 [J].矿产保护与利用，2017，37(1)：90-97.

[27] 杨伟龙，白宇明，李永利，等.内蒙古包头某铁矿尾矿库生态修复的植物优选研究 [J].中国地质，2022，49(3)：683-694.

[28] 葛元英，乔乔，张鹏，等.晋南铬渣堆场主要植物重金属富集特征 [J].环境污染与防治，2020，42(7)：833-837.

[29] 周佳佳.三种植物种子萌发和幼苗生长对重金属环境胁迫的响应研究 [D].临汾：山西师范大学，2022.

[30] 张粉果，霍文涛，张三庆，等.AMF 对 Cd 胁迫下虎尾草生长、生理特性及 Cd 积累的影响 [J].北京师范大学学报(自然科学版)，2025，61(2)：161-169.

[31] 何念鹏，吴泠，姜世成，等.扦插玉米秸秆改良松嫩平原次生光碱斑的研究 [J].应用生态学报，2004，15(6)：969-972.

[32] 何念鹏，吴泠，周道玮.扦插玉米秸秆对光碱斑地虎尾草和角碱蓬存活率的影响 [J].植物生态学报，2004，28(2)：258-263.

[33] 王彦庆，李洪影，李冰，等.盐碱草地补播虎尾草、野大麦同时覆盖秸秆对土壤酶活性的影响 [J].草地学报，2015，23(4)：738-743.

[34] 李洪影.生物措施对松嫩平原盐碱退化草地改良效果的研究 [D].哈尔滨：东北农业大学，2014.