

分类号：
学号：20222112037

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



减氮配施生物有机肥对土壤养分、苹果果实品质及产量的影响

学位申请人

姚瑞赞

指导教师

白茹 副教授

于庆帆 助理研究员

申请学位类别

农业硕士

专业名称

农业

研究领域

农艺与种业

所在学院

农学院

中国·新疆·石河子

2024年5月

分类号：
学号：20222112037

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



减氮配施生物有机肥对土壤养分、苹果果实品质及产量的影响

学位申请人	姚瑞赞
指导教师	白茹 副教授 于庆帆 助理研究员
申请学位类别	农业硕士
专业名称	农业
研究领域	农艺与种业
所在学院	农学院

中国·新疆·石河子
2024年5月

**Effects of Nitrogen Reduction Combined Bio-organic Fertilizer on Soil
Nutrients, Apple Fruit Quality and Yield**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agriculture

By

Yao Rui-yun

(Agronomy and Seed Industry)

Dissertation Supervisor: Associate Prof. Bai Ru

Assistant Researcher. Yu Qing-fan

May, 2024

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：姚瑞媛

时间：2024年5月21日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：姚瑞媛

时间：2024年5月21日

导师签名：白茹

时间：2024年5月21日

摘要

目的：合理减少氮肥用量，用生物有机肥替代部分化肥，是缓解化肥施用不良生态效应、实现作物高效栽培的有效措施。因此，探究苹果种植过程中氮肥减施及生物有机肥的配施量具有重要的现实意义。本试验通过探究减氮配施生物有机肥处理对土壤养分、酶活性、苹果叶片养分、果实品质及产量的具体影响，旨在为新疆伊犁地区苹果种植中的施肥问题提供理论参考。

方法：本研究以‘天红二号’苹果为试验材料，分别在苹果开花期，果实膨大期施氮量减少 20%，40%，60%，并配合施用生物有机肥（腐殖酸+枯草芽孢杆菌），以常规施肥量为对照，对不同施肥处理的土壤养分、土壤酶活性、叶片养分、苹果果实品质及产量进行测定。

结果：1. 对土壤养分的影响：与 T1 常规施肥量相较，各减氮配施生物有机肥处理均显著提高了 0–20 cm 深土壤中全氮、全磷、全钾及全钙含量，且有效磷、速效钾、土壤有机质含量分别显著提高了 55.23%~69.76%、47.80%~60.51%及 52.52%~73.80%。

2. 对土壤酶活性的影响：与 T1 常规施肥量相较，减氮配施生物有机肥处理下 0–20 cm 深土壤的酶活性显著提高。其中土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶及亚硝酸还原酶活性分别显著提高了 23.58%~45.59%、56.86%~72.57%、69.16%~78.23%、53.38%~69.06%。此外，相关性分析表明 0–20cm 深土壤中，大多数土壤养分指标均与土壤酶活性呈正相关。

3. 对苹果叶片养分的影响：与 T1 常规施肥量相较，各减氮配施生物有机肥处理均提高苹果叶片养分含量，且叶片磷、钙及镁含量分别显著提高了 22.48%~33.20%、30.02%~51.74%及 8.98%~18.88%。

4. 对苹果果实品质的影响：与 T1 常规施肥量相较，T2 及 T3 处理可以显著提高苹果果实品质。其中 VC 含量、糖酸比、可溶性蛋白、可溶性糖含量、果皮类胡萝卜素、花青苷含量分别显著提高了 19.90%~31.44%、23.41%~37.11%、30.14%~37.16%、14.86%~16.15%、40.05%~44.64% 及 30.14%~31.77%；果皮总叶绿素含量显著降低了 11.28%~14.22%，果实着色系数 L*、a*、b*、C 值及 h° 变化不显著。本研究发现苹果果实中主要香气物质为酯类，与 T1 常规施肥量相较，T2 处理酯类物质的相对含量提高了 4.11%。且 T2 处理酯类物质中的乙酸己酯相对含量最高，相较于 T1 显著提高了 78.50%。烃类、醇类、醛类、酮类等其他香气物质的含量相对较低，且变化规律不明显。

5. 对苹果产量的影响：与 T1 常规施肥量相较，T2 及 T3 处理能显著提高苹果产量。其中亩产量及氮肥偏生产力分别显著提高了 7.94%~10.21%、7.59%~10.21%。

结论：综上所述，减少氮肥施用量并配合施用生物有机肥，可以有效培肥土壤，增强土壤养分含量及酶活性。同时，这种施肥方式还能显著提高叶片养分含量及果实产量，并显著改善果实的品质，增强果实的香气。通过综合分析认为减氮 20%配施生物有机肥的处理表现最佳，可在伊犁地区苹果种植中使用。

关键词：苹果；减氮；生物有机肥；土壤养分；果实品质

Abstract

Objective: Rational reduction of nitrogen fertilizer application and substitution of some chemical fertilizers with biological organic fertilizers are effective measures to alleviate the adverse ecological effects of chemical fertilizer application and achieve efficient crop cultivation. Therefore, it is of great practical significance to explore the reduction of nitrogen fertilizer and the appropriate application of bio-organic fertilizer in apple cultivation. This study aims to provide theoretical references for fertilization problems in apple cultivation in Yili, Xinjiang, by exploring the specific effects of nitrogen reduction and bio-organic fertilizer application on soil nutrients, enzyme activity, apple leaf nutrients, fruit quality and yield.

Methods: This experiment used 'Tianhong 2' apples as materials. Nitrogen application was reduced by 20%, 40%, and 60% at the flowering stage and fruit enlargement stage, respectively, with the application of biological organic fertilizer (Humic acid + *Bacillus subtilis*) as a supplement. The conventional fertilization rate was used as a control. The soil nutrients, soil enzyme activity, leaf nutrients, apple fruit quality and yield were measured under different fertilization treatments.

Results:

1. Effects on soil nutrients: Compared with the conventional fertilization of T1, the treatment of reducing nitrogen combined with bio-organic fertilizer significantly increased the content of total nitrogen, total phosphorus, total potassium and total calcium in the soil at a depth of 0–20 cm. The content of available phosphorus, available potassium and soil organic matter increased significantly by 55.23%~69.76%, 47.80%~60.51% and 52.52%~73.80% respectively.
2. Effects on soil enzyme activities: Compared with the conventional fertilization of T1, the soil enzyme activities in the 0–20 cm depth soil under the treatment of reducing nitrogen and applying biological organic fertilizer were significantly improved. Among them, soil catalase, urease, invertase and nitrite reductase increased significantly by 23.58%~45.59%, 56.86%~72.57%, 69.16%~78.23%, and 53.38%~69.06%, respectively. In addition, correlation analysis showed that most of the soil nutrient indicators in the 0-20 cm depth soil were positively correlated with soil enzyme activities.
3. Effects on apple leaf nutrients: Compared with the conventional fertilization of T1, all treatments of reducing nitrogen and applying biological organic fertilizer increased the nutrient content of apple leaves, and the phosphorus, calcium, and magnesium content of leaves were significantly increased by 22.48%~33.20%, 30.02%~51.74%, and 8.98%~18.88%, respectively.
4. Effects on apple fruit quality: Compared with the conventional fertilization of T1, T2 and T3 treatments can significantly improve the quality of Apple fruit. Among them, VC content, sugar-acid ratio, soluble

protein, soluble sugar content, carotenoids in peel, anthocyanin content were significantly increased by 19.90%~31.44%, 23.41%~37.11%, 30.14%~37.16%, 14.86%~16.15%, 40.05%~44.64% and 30.14%~31.77%, respectively; the total chlorophyll content of the peel was decreased significantly by 11.28%~14.22%, and the fruit coloration coefficients L^* , a^* , b^* , C value and h° changed to different degrees. This study found that the main aroma substances in apple fruits are esters. Compared with the conventional fertilization amount of T1, the relative content of esters in T2 treatment increased by 4.11%. Moreover, the relative content of hexyl acetate in esters in T2 treatment was the highest, which was significantly increased by 78.50% compared with T1 treatment. The contents of other aroma substances such as hydrocarbons, alcohols, aldehydes, ketones, etc. were relatively low, and the change law was not obvious.

5. Effects on apple yield: Compared with the conventional fertilization of T1, T2 and T3 treatments can significantly increase apple yield. Among them, the per mu yield and PFP_N increased significantly by 7.94%~10.21% and 7.59%~10.21%, respectively.

Conclusion: In summary, reducing the amount of nitrogen fertilizer and combining it with the application of biological organic fertilizer can effectively improve soil fertility, increase soil nutrient content and enzyme activity. At the same time, this fertilization method can also significantly improve the nutrient content of leaves and fruit yield, significantly improve the quality of fruit, and enhance the aroma of fruit. Through comprehensive analysis, it is believed that the treatment of reducing nitrogen by 20% and applying biological organic fertilizer shows the best performance, which can be used in apple planting in Yili area.

Key words: apple; nitrogen reduction; biological organic fertilizer; soil nutrients; fruit quality

目录

摘要	I
Abstract	II
主要符号表(List of main symbols)	VI
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 氮肥减施研究现状	1
1.2.1 氮肥减施对土壤养分的影响	2
1.2.2 氮肥减施对土壤酶活性的影响	2
1.2.3 氮肥减施对作物品质及产量的影响	3
1.3 腐殖酸研究现状	4
1.3.1 腐殖酸对土壤养分的影响	4
1.3.2 腐殖酸对土壤酶活性的影响	6
1.3.3 腐殖酸对作物品质及产量的影响	6
1.4 枯草芽孢杆菌研究现状	6
1.4.1 枯草芽孢杆菌对土壤的影响	7
1.4.2 枯草芽孢杆菌对作物品质和产量的影响	7
1.5 减氮配施生物有机肥相关研究	8
1.5.1 减氮配施生物有机肥对土壤的影响	8
1.5.2 减氮配施生物有机肥对作物品质及产量的影响	8
1.6 研究目的与意义	8
1.7 技术路线	10
第 2 章 减氮配施生物有机肥对土壤养分及酶活性的影响	11
2.1 材料与方法	11
2.1.1 试验地概况	11
2.1.2 试验材料	11
2.1.3 试验设计	12
2.1.4 测定项目及方法	12
2.1.5 数据分析	13
2.2 结果与分析	13
2.2.1 减氮配施生物有机肥对土壤化学性质的影响	13

2.2.2 减氮配施生物有机肥对土壤全量元素含量的影响	17
2.2.3 减氮配施生物有机肥对土壤酶活性的影响	21
2.2.4 相关性分析	28
2.3 讨论	29
2.3.1 减氮配施生物有机肥对土壤养分的影响	29
2.3.2 减氮配施生物有机肥对土壤酶活性的影响	29
2.4 小结	30
第 3 章 减氮配施生物有机肥对苹果叶片养分、果实品质及产量的影响	31
3.1 材料与方法	31
3.1.1 试验地概况	31
3.1.2 试验材料	31
3.1.3 试验设计	31
3.1.4 测定项目与方法	31
3.1.5 数据分析	33
3.2 结果与分析	33
3.2.1 减氮配施生物有机肥对苹果叶片养分的影响	33
3.2.2 减氮配施生物有机肥对苹果果实品质的影响	36
3.2.3 减氮配施生物有机肥对苹果果实着色的影响	42
3.2.4 减氮配施生物有机肥对苹果果实香气的影响	44
3.2.5 减氮配施生物有机肥对苹果产量的影响	47
3.3 讨论	49
3.3.1 减氮配施生物有机肥对苹果叶片养分的影响	49
3.3.2 减氮配施生物有机肥对苹果果实品质及产量的影响	49
3.3.3 减氮配施生物有机肥对苹果果实着色的影响	50
3.3.4 减氮配施生物有机肥对苹果果实香气的影响	51
3.4 小结	51
第 4 章 结论与展望	53
4.1 结论	53
4.2 展望	53
参考文献	54
致谢	63
作者简介	64
导师评阅表	65

主要符号表(List of main symbols)

缩略词	英文全称	中文全称
a*	Red-green axis	红绿色度
AK	Available potassium	速效钾
AN	Alkali-hydrolyzable nitrogen	碱解氮
AP	Available phosphorus	有效磷
b*	Yellow-blue axis	黄蓝色度
C	Color intensity	着色强度
h°	Tone	色度角
L*	Brightness	亮度
NH ₄ -H	Ammonium nitrogen	铵态氮
NO ₃ ⁻	Nitrate nitrogen	硝态氮
PFP _N	Partial factor productivity from applied N	氮肥偏生产力
S-ACP	Soil acid phosphatase	土壤酸性磷酸酶
S-ACPT	Soil protease	土壤蛋白酶
S-CAT	Soil catalase	土壤过氧化氢酶
S-CL	Soil lellulase	土壤纤维素酶
S-DHA	Soil dehydrogenase	土壤脱氢酶
S-NiR	Soil nitrite reductase	土壤亚硝酸还原酶
S-NR	Soil nitrate reductase	土壤硝酸还原酶
SOM	Soil organic matter	土壤有机质
S-POD	Soil peroxidase	土壤过氧化物酶
S-SC	Soil saccharase	土壤蔗糖酶
S-UE	Soil urease	土壤脲酶
TCa	Total calcium	全钙
TK	Total potassium	全钾
TMg	Total magnesium	全镁
TN	Total nitrogen	全氮
TP	Total phosphorus	全磷
Vc	Vitamin C	维生素 C

第1章 绪论

1.1 引言

苹果 (*Malus pumila* Mill.) 是世界上食用最广泛的水果, 品种栽培遍及全球 80 多个国家和地区。中国拥有悠久的苹果栽培历史, 同时地理、气候、人力资源和市场条件也极为优越 (刘英杰, 2005)。新疆作为中国新兴的苹果优势产区 (任佳佳等, 2023), 其独特的地理和气候条件为苹果的生长发育提供了得天独厚的优势。其中, 以阿克苏地区、伊犁河谷为代表的苹果主产区所产出的苹果不仅产量高, 而且品质佳, 色泽鲜艳, 风味浓郁, 备受国内外消费者的喜爱 (徐德源, 1989; 王建等, 2006)。正确的施肥技术和合理的施肥量是提高苹果品质的关键 (王爱玲等, 2022)。合理施肥可以供给苹果生长所需的养分, 以提高果实品质 (李琛悦, 2019; 赵佐平, 2014)。近年来, 伊犁地区富士苹果因施肥方法、施肥方式没有统一标准, 果农在果树栽培过程中盲目的滥施肥料, 尤其在不断增加的氮肥用量下, 造成了果园土壤养分失衡、产量不稳定、果实品质下降 (张东亚等, 2014)。过量的使用氮肥不但会使果实品质降低、产量减少, 还会造成肥料资源的浪费, 环境的污染 (宋培植, 2022)。

生物有机肥能够改变土壤中的微生物环境, 增加土壤酶的活性, 使植株在苗期根系发育和吸收能力得到提高, 活化土壤营养系统 (刘健, 2000), 改变微生物区系, 降低土壤容重 (Yunus et al., 2018), 并能提高植株的抗病性, 减少病害 (邓家礼等, 2015), 促进作物发育 (Guo et al., 2016), 可以明显提高作物产量, 改善作物品质。合理减少氮肥用量, 用生物有机肥替代部分无机氮, 是缓解化肥施用带来的不利环境影响、实现作物高效栽培的有效措施, 可以减少施用氮肥造成的环境污染 (白由路, 2018; 任科宇等, 2019)。由于不同地区土壤条件差异较大, 盲目进行氮肥减施并配施生物有机肥可能造成苹果产量降低, 进而会影响果农经济效益。因此本研究以‘天红二号’苹果为试验材料, 以常规施肥量作为对照, 等比例减少氮肥施用量同时配合施用腐殖酸及枯草芽孢杆菌生物有机肥, 研究不同施肥处理下土壤养分、土壤酶活性、叶片全量养分、苹果果实品质及产量的影响。通过研究结果分析, 推荐最适宜的氮肥减施量, 以期为新疆伊犁等地区苹果施肥中的减氮问题提供理论参考, 促进农户增收。

1.2 氮肥减施研究现状

化肥在我国农业生产中具有非常重要的作用, 在果树栽培中, 为了获得更大的产量

和经济效益，通常都会在作物生长发育过程中大量的使用化肥，尤其是氮肥的使用。氮肥长期过量使用已经引起一系列土壤环境问题，土壤氮素出现盈余，土壤残留量增加，土壤养分失衡严重，土壤质量劣化，面源问题加重（巨晓棠等，2014；武良等，2016）。另外，农田氮肥的投入量对作物产量的贡献呈现递减趋势，严重影响农业可持续生产（Yan et al., 2014；Yang et al., 2017）。在确保作物产量稳定的前提下，通过科学合理地减少化肥使用量，我们不仅能够有效改善土壤环境，而且对于提升作物品质、推动农业可持续发展具有深远的意义。化肥在农业生产中对于提高作物产量具有关键作用。然而，过度追求高产稳产，导致化肥使用过量，这不仅不利于作物的生长，还可能对环境造成负面影响。过度的使用化肥已经造成了肥料利用率下降（李东坡等，2008）、农作物品质及产量降低、土壤和环境污染，这对农业的可持续发展提出了挑战。近年来，由于农业的可持续发展和生态环境被世界各国高度重视，过量使用化肥是一个亟待解决的问题。如何提高化肥的有效利用率，使作物的品质和产量结合起来，是作物栽培中需要解决的问题。对于实现农业的可持续发展和对保护生态环境而言，减少氮肥的使用量是一个可行的途径（Li et al., 2017）。近年来，众多科研工作者致力于研究化肥减量施用对作物品质和产量的影响。经过大量的研究，他们发现，适度减少氮肥的施用量，不仅不会使作物产量降低，还有助于改善作物的营养品质。这一举措不仅减少了氮肥资源的浪费，提高了肥料的利用效率，而且有助于降低化肥对环境的污染，从而减轻对生态环境的压力。

1.2.1 氮肥减施对土壤养分的影响

氮素是作物需求量大，但土壤供应量又相对较少的营养元素（南镇武等，2016）。土壤中固有氮主要以有机氮的形式存在，这种形式的氮不易被作物吸收和利用。相比之下，能够被作物直接吸收利用的无机态氮在土壤中的比例不足 10%（Matsumoto et al., 2004）。有研究表明，随着氮素施用量的持续增加，土壤酸碱度会显著降低，土壤酸化严重，这会造成土壤板结、养分流失，严重影响土壤微生物的活性，从而显著降低土壤硝化速率（滕颖等，2020）。也有研究表明，通过科学施用氮肥，黄土高原的旱地土壤在 0-20 cm 土层内的有机碳氮通过科学合理施肥而得到有效积累，从而提高土壤的氮素矿化潜力。同时，氮素矿化速度也可以通过合理调控得到降低，旱地土壤中有机氮及有机碳含量都可以显著提高，土壤供应氮素的能力也得到提升（王慧等，2016）。Jones 等（2009）研究发现，长期施用氮肥会使得土壤中全氮、铵态氮和硝态氮的含量增加，并且表现为随土壤施氮量的增加而增加。有人也得出相似的研究结果，并他们认为长期施用氮肥能够使农田土壤氮库显著增加（李文祥等，2007）。土壤中的有机氮是作物生长发育过程中起重要作用的氮源和库，直接决定了土壤的氮素供应能力（吴汉卿，2017）。张永全等（2015）研究认为，外源氮肥的投入对土壤有机氮含量并不会产生显著影响。

柳瑞等（2020）研究得出，短期内减少氮肥的施用量对稻田土壤的有机质、全氮、铵态氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾影响不显著。张璐等（2020）则认为，与农户常规施氮量相比，双季稻地区施氮量减少 20%~40%均能够更好的维持土壤中有有机质、氮、磷、钾的供应，其中土壤的有机质和全氮含量均呈现上升的变化趋势。李跃飞等（2020）通过研究甘蓝的氮肥减施量得出，与常规施氮量相比，甘蓝地施氮量减少 20%后土壤的碱解氮含量、有机质含量、有效磷含量及速效钾含量都显著增加。但也有学者研究认为，随种植年限的增加，氮素的亏缺会使土壤养分贮量和氮供应能力下降，进而影响作物生长（刘艳等，2020）。

1.2.2 氮肥减施对土壤酶活性的影响

土壤酶活性是衡量土壤中微生物活跃程度及养分转化效率的重要指标，能够反映土壤养分的状况及生产力水平（邱悦等，2022）。土壤中施用氮肥，可通过对土壤酶活性的调控，进而影响土壤氮素的保持能力及氮肥的利用效率（Wang et al., 2020）。有研究表明减施氮肥可以提高土壤转化酶、过氧化氢酶与碱性磷酸酶活性（Wang et al., 2021），他们认为这是由于在减少氮肥施用的同时，引入了具有显著生物活性和促进生长作用的缓释氮肥。这种氮肥有效激发了土壤中转化酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活性，促进了氮素在土壤中的转化过程。这种转化确保了土壤中氮素的持续供应与作物需求之间的同步，从而促进了作物根系的发育生长，使土壤氮素的有效性得以增加。此外，这种施肥处理也为土壤微生物的生长提供了充足的氮源，加快了它们的生长繁殖，进而提高了土壤的微生物繁殖力和养分供应能力（弓建泽等，2021）。刘领等（2016）通过对烤烟进行盆栽试验，研究发现适度减少氮肥的施用量并不会对烤烟土壤酶活性产生显著影响。更进一步的研究表明，相较于常规施肥，减少氮肥施用量 10%反而有助于提升土壤脲酶和过氧化氢酶的活性。同时，当氮肥施用量减少 20%时，土壤蔗糖酶的活性会得到更为明显的提升。刘红杰等（2023）研究发现，在秸秆还田的同时，合理配合施用氮肥，能够有效提升土壤中过氧化氢酶、碱性磷酸酶以及转化酶的活性。此外，适度减少氮肥的施用量，更有利于土壤酶活性的提升。这些研究结果也反映出适量减少氮肥的施用，不仅可以降低土壤中残留的氮肥量，还有助于优化氮素在土壤中的利用效率。此外，减施氮肥后土壤酶活性的提高，也反映出土壤微生物数量及多样性的增加，土壤生态系统朝更健康的方向发展。

1.2.3 氮肥减施对作物品质及产量的影响

在植物的生长发育过程中，氮素是一种很关键的化学元素，直接影响着作物的品质和产量。在农作物的生产中使用氮肥会提高农作物的产量，但是过度的使用氮肥也会对

作物的品质和产量造成影响 (Roelcke et al., 2004), 这不仅减少了经济效益, 也给土壤和生态环境带来了不利的影响。研究表明, 合理的减少氮肥的使用, 对作物的正常生长发育和产量不会造成影响, 而且肥料的利用率还得到有效提高, 从而减少化肥对环境造成的污染, 促进资源的可持续的利用。吴昕怡 (2018) 研究结果表明, 在设施番茄栽培中, 减氮 30% 处理的效果更好, 番茄产量最高。谭宏伟等 (2014) 研究表明, 在甘蔗生育期施氮量减少 30%~40%, 单位面积的甘蔗产量没有降低, 而且维持在较高水平。刘培等 (2019) 研究表明, 华南地区甜玉米与大豆间作栽培, 减少 20% 左右的氮肥使用量, 土壤有机质含量和全量养分含量并未产生不良影响。同时, 这种减量施肥的措施也没有造成甜玉米与大豆间作系统产量的下降。在高淑峰等 (2017) 的研究中表明, 在一定的范围内使用氮肥, 其产量得到提高, 但是氮肥的使用量超过了一定的范围, 明显的降低了氮肥的有效性, 甚至会导致减产。姜春霞等 (2022) 对鲜食玉米进行了氮肥减量施用的研究, 其研究结果显示, 适量施用氮肥可以显著提升鲜食玉米的产量, 然而, 氮肥的过量施用并未带来产量的显著增加。在连续三年的试验中, 减少 25% 的施氮量处理在平均产量上表现最优。这一处理不仅未显著影响玉米的产量、营养品质以及吸氮量, 还成功提高了氮肥的利用效率, 并显著减少了土壤剖面硝态氮的累积量。朱华清等 (2023) 以贵长猕猴桃作为实验对象, 旨在探究不同氮肥减施处理对猕猴桃产量及果实品质的影响。经过系统研究, 他们发现当氮肥减施 10% 时, 猕猴桃的产量和果实糖度均达到最佳状态, 大果率也呈现出上升的趋势。进一步分析表明, 随着氮肥施用量的减少, 猕猴桃果实的 pH 值呈现先下降后上升的变动趋势, 其中氮肥减施 10% 处理的果实糖度最为理想。此外, 该研究还发现, 相较于常规施肥处理, 氮肥减施 10% 处理的肥料利用率和氮肥偏生产力均有所提升。氮肥是植物生长发育必需的元素, 减施氮肥会影响作物生长和产量。但是, 如果土壤氮素水平过高, 会导致植物吸收钾、磷等其他元素的能力下降, 从而影响作物生长和产量。因此, 适量减施氮肥能够提高作物的产量和品质。

1.3 腐殖酸研究现状

腐殖酸 (*Humic acid*) 是一种来源于动植物的遗骸, 后期又通过微生物的分解、转化, 经过地球化学过程的积累而形成的一种独特的天然有机物质。这种物质在肥料制造领域的应用广泛, 以泥炭、褐煤、风化煤等富含腐殖酸的物质为基础原料, 结合钾、钠、磷、钙、镁等营养元素化合物, 精心制作而成。腐殖酸肥料具有独特的化学性质和卓越的肥效, 在农林生产实践中拥有广阔的应用前景 (李小为等, 2009)。此外, 腐殖酸也是一种含有芳香结构的天然大分子有机酸, 它的基本结构是由芳环及脂环所构成, 环上连接着羟基、羧基、甲氧基、羰基等官能团。腐殖酸又可将其分为黄腐酸 (*Fulvic acid*)、棕腐酸 (*Ulmic acid*) 及黑腐酸 (*Humus acid*) 等不同类型 (刘征捷, 2020)。腐殖酸具

备溶解性、酸性、离子交换性、络合性以及生理活性等多重特性，这些性质共同作用使得腐殖酸能够在正负两个方向上有效调节土壤的 pH 值，并显著提升土壤的交换容量，从而帮助实现酸碱平衡（黄占斌，2022）。腐殖酸富含多种官能团，具有较强的离子交换和吸附性能。这使其在土壤中发挥着重要作用，能够有效提升土壤中速效钾的含量，进而促进植物对氮元素的吸收。此外，腐殖酸还能降低磷的固定性，确保氮、磷、钾这三种关键营养元素在土壤中得到有效贮存和利用。许多研究表明，腐殖酸不仅可以使化肥提质增效，还可以改良土壤，刺激植物生长。此外，腐殖酸来源广泛，安全无毒，并对环境友好（王雅婷，2023）。腐殖酸作为一种生物有机肥，其内在丰富的腐殖质成分能够有效活化土壤中的养分，提升氮、磷、钾等营养元素的利用效率。此外，腐殖酸还能有效促进土壤中酶对糖分、淀粉、蛋白质及多种维生素的合成与运转过程，从而将多糖转化为可溶性糖，为淀粉和蛋白质的合成积累提供有力支持。这些作用不仅有助于果实的增大，还能显著提升果实的含糖量。此外，腐殖酸本身具备氧化还原性，能够提高作物根系的呼吸强度，为其根系正常的生命活动提供必要的能量支持（刘文倩，2022；赫臣，2019）。腐殖酸还能促进土壤团粒结构的形成，可以改变盐碱土的表面结构，影响盐分的提升，从而起到了隔离盐分的作用，提高了土壤保肥及肥料供应能力，减少了养分的损失，延长了土壤的肥力供应时间（刘征捷，2020）。除此之外，腐殖酸还具备优化土壤结构、增加土壤保水能力以及提高土壤耐寒性能的能力。

1.3.1 腐殖酸对土壤养分的影响

肥料在用法用量上的不合理使用，不但会使作物中有害物质含量增加，从而降低农产品品质，还会降低肥料的利用效率，使土壤中营养元素的淋溶渗漏增加，从而引发严重的环境污染问题（庄文化，2023）。而腐植酸可以在提高化肥利用效率的同时，又可以减轻化肥对土壤理化性状的负面影响，进而提升土壤肥力。因此，合理利用腐植酸对于改善土壤质量、提高农产品品质，对保护环境也具有重要意义（张丽等，2023）。大量研究表明，与单一化学肥料相比，腐植酸肥料能显著改善作物根际土壤化学指标，进而提高土壤化学肥力，促进作物生长发育（余庆宇等，2023）。李泽丽等（2018）在小麦种植过程中发现施用含有黄腐酸的腐植酸控释尿素，不仅实现了控释尿素的协同增效，特别是在促进根际土壤硝态氮、有效磷含量等方面具有突出优势，较对照分别增幅分别达到了 54.7%、19.6%，而且实现了一次基施可显著提高小麦中后期根际土壤氮养分供应强度的作用的效果，满足了小麦各生育期的氮素需求，提高了小麦地上部生物量和籽粒产量水平。还有研究发现腐殖酸施肥可以显著改善酸化土壤的理化性状。相较于普通土壤调理剂，施用腐殖酸可使土壤容重降低，粉粒含量及孔隙度增加。（陈士更，2019）。这些结果表明，腐殖酸施肥对于优化土壤结构、提升土壤肥力具有积极作用。郑毅等（2019）研究表明膨润土-腐植酸型改良剂在减少土壤氨挥发和氧化亚氮排放方

面表现出显著效果。同时,经过腐殖酸改良的沙质土壤能够促进氮素向玉米籽粒的转移,进而提升玉米籽粒的产量。张宏伟等(2002)的研究表明,腐殖酸可提高土壤磷素的利用率。腐殖酸在增加土壤养分有效性方面作用显著,具有较高的经济效益和生态效益(Li et al., 2020)。

1.3.2 腐殖酸对土壤酶活性的影响

腐殖酸具有稳定的碳形态,能够有效激发生物及微生物的活性(Pinton et al., 1999)。此外,腐殖酸还能刺激植物酶的活性,从而提高作物产量。在作物的生长过程中,腐殖酸作为一种有机催化剂,可以促进土壤中有益微生物的繁殖和生长,从而增强作物对病虫害的抵抗能力(张丽等, 2023)。范仲卿等(2022)研究表明在辣椒种植过程中,使用含有6%腐殖酸质量分数的复合肥相较于普通复合肥,能够显著提升土壤脲酶活性、碱性磷酸酶活性,同时增加土壤有机质含量、有效磷含量、速效钾含量以及碱解氮含量。这种提升效果在连续使用过程中逐年增强,显示出腐殖酸复合肥在辣椒种植中的长期效益。通过连续施用腐殖酸复合肥,可以确保土壤酶活性和养分含量的稳定高水平,为辣椒的生长发育提供充足的土壤条件。与施用等量无机养分相较,施用腐殖酸复合肥可以增加土壤活跃微生物量、提高酸性磷酸酶和蔗糖酶活性(刘兰兰, 2011)。因此,腐殖酸能调节土壤中微生物的种类和数量,显著增强特定酶的活性。

1.3.3 腐殖酸对作物品质及产量的影响

腐殖酸影响植物种子萌发、根系发育,合理施用腐殖酸还可以促进植株对养分的吸收,提高产量(Sun et al., 2019)。腐殖酸中的活性物质能够促进植物体内的养分平衡和代谢过程,增加植物体内维生素、矿物质等营养成分的含量,改善农产品品质。适当施用腐殖酸肥料可以提高蔬菜中维生素C的含量和水果的甜度,改善口感和营养价值。有研究表明施用腐殖酸能提高棉花叶片叶绿素含量、促进光合作用,每亩施6 kg腐殖酸棉花产量比对照提高10.8%(王静等, 2015)。施加黑液腐殖酸肥料促进棉花对氮、磷、钾养分的吸收,提高棉花产量,施肥量为每公顷2250 kg时棉花产量最高(王平等, 2015)。王安东等(2008)将腐殖酸镁(每亩2 kg)、腐殖酸钾(每亩15 kg)施入水稻田水稻产量分别增加6.1%、1.5%,水稻叶瘟病分别降低5.7%、2%。寸待泽等(2017)发现腐殖酸可以提高果树的抗性,当与农药配合施用时可增强药效、降低农药的毒害性。刘会丽等(2023)发现施用腐殖酸复合肥后,花生的产量、品质均有不同程度的提高。另外,经过腐殖酸处理的大豆,相较于对照组,其产量增加了36.5%。在油菜的栽培过程中,腐殖酸的应用也能够显著提升油菜的产量和经济效益(高亮等, 2020)。因此,适当施用腐殖酸肥料可以显著增加粮食、蔬菜、水果等作物的产量,改善作物品质,提高经济