

根系互作对苹果生长及¹⁵N—尿素吸收、利用和土壤残留的影响

彭玲, 刘晓霞, 何流, 徐新翔, 葛顺峰, 姜远茂

(山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 在苹果/白三叶(M1)和苹果/黑麦草(M2)复合系统中, 设置根系分隔(完全分隔 N1、尼龙网分隔 N2、不分隔 N3), 采用¹⁵N 同位素示踪技术, 研究了根系互作对苹果生长及¹⁵N 吸收、利用, 损失和土壤残留的影响。结果表明: 苹果新梢旺长期, 在 M1 中苹果各生长指标均为 N3>N2>N1, 在 M2 中趋势相反。与 N1 处理相比, M1 中 N2 和 N3 处理苹果¹⁵N 利用率分别增加了 11.91% 和 18.96%, M2 中分别降低了 5.76% 和 8.99%, 苹果全氮量和¹⁵N 吸收量趋势相同。苹果根区土壤¹⁵N 丰度、总氮含量和¹⁵N 残留率均以 N1 处理最高, N3 处理最低; 苹果落叶期, 两种复合体系中均以 N3 处理的苹果各生长指标最大, N1 处理最低。在 M1 中 N2 和 N3 处理苹果根区土壤¹⁵N 丰度分别比 N1 处理增加了 22.33% 和 34.15%, 在 M2 中增幅分别为 13.73% 和 21.44%, 土壤总氮含量呈相同趋势。M1 和 M2 中苹果全氮量、¹⁵N 吸收量和各器官 Ndff 值差异显著, 均为 N3>N2>N1。与 N1 处理相比, M1 中 N2 和 N3 处理下苹果¹⁵N 利用率分别增加了 19.11% 和 42.66%, 而¹⁵N 损失率分别降低了 13.55% 和 27.12%, 在 M2 中趋势相同。苹果生长前期, 黑麦草和苹果以负相竞争为主, 白三叶对其促进效果亦不显著。而至苹果生长后期, 两种牧草和苹果根系互作降低了苹果根区氮素损失, 促进了苹果的氮素吸收利用和营养生长, 且以间作白三叶效果最好。

关键词: 苹果; 生草栽培; 根系互作; ¹⁵N—尿素; 根系分隔

中图分类号: S661.1; S344.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0353-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.056

Effects of Root Interaction on the Apple Tree Growth, and Absorption, Utilization and Soil Residue of ¹⁵N—urea

PENG Ling, LIU Xiaoxia, HE Liu, XU Xinxiang, GE Shunfeng, JIANG Yuanmao

(State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: A pot experiment was carried out in apple-*Trifolium repens* Linn. (M1) and apple-*Lolium perenne* L. (M2) intercropping system to investigate the effects of root interaction on the growth and ¹⁵N—urea absorption, utilization, loss and residue of apple trees under different root barrier method (N1, N2 and N3 were equivalent to solid barrier, mesh barrier and no barrier, respectively), using the ¹⁵N—labeled tracer technique. Results showed that, at new shoot growing stage, the growth index of apple trees displayed an order of N3>N2>N1 in M1 intercropping system, while the opposite tendency was observed in M2 intercropping system. Compared with N1 treatment, the ¹⁵N utilization rate of apple trees increased by 11.91% and 18.96% in M1 intercropping system under N2 and N3 treatment, but decreased by 5.76% and 8.99% in M2 intercropping system. The plant total N content and ¹⁵N absorption amount showed the same tendency. The effect on ¹⁵N abundance and total N content in the soil of apple trees were the most significant in N1 treatment, and the least in N3 treatment. At leaf fall period, the growth index of apple trees was obviously the highest in N3 treatment, and the lowest was found in N1 treatment. In comparison with N1 treatment, the soil ¹⁵N abundance of apple trees under N2 and N3 treatment increased by 22.33% and 34.15% in M1 intercropping system, and the rate of increase in M2 intercropping system were 13.73% and 21.44%, the total N content in the soil of apple trees showed the same tendency. There were significant

收稿日期: 2018-02-28

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201100); 国家自然科学基金项目(31501713); 国家现代农业产业技术体系建设资金项目(CARS-27)

第一作者: 彭玲(1988—), 女, 在读博士研究生, 主要从事苹果营养生理和土壤肥力研究。E-mail: zhushipink@163.com

通信作者: 姜远茂(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事果树营养生理和土壤肥力研究。E-mail: ymjiang@sdau.edu.cn

葛顺峰(1985—), 男, 讲师, 主要从事果树营养生理与氮、磷循环研究。E-mail: geshunfeng210@126.com

differences in plant total N content, ^{15}N absorption amount and Ndff value among the treatments, which was in a trend of $\text{N3} > \text{N2} > \text{N1}$ in M1 and M2 intercropping system. The ^{15}N utilization rate of apple trees under N2 and N3 treatment were 19.11% and 42.66% higher than that of N1 treatment, with the ^{15}N loss rate were 13.55% and 27.12% lower than that of N1 treatment in M1 intercropping system, the same trend was showed in M2 intercropping system. Overall findings showed that it mainly showed a competitive effect in apple-*Lolium perenne* L. intercropping system and a relatively minor positive effect in apple-*Trifolium repens* Linn. intercropping system during early stages of apple growth. While in the later period of apple growth, the root interaction in forage grasses and apple trees reduced nitrogen loss and consequently improved the absorption, utilization of nitrogen nutrition and the growth of apple trees by a certain degree, and *Trifolium repens* Linn. played a better effect than *Lolium perenne* L.

Keywords: apple; interplantation of herbage; root interaction; ^{15}N -urea; root barrier

作为优良的果园土壤管理模式,生草栽培是多年生木本植物和牧草在空间上有机结合构建形成的多物种、多层次和多时序的复合生态系统^[1],具有良好的生态效益和经济效益。在多物种共存的复合系统中,各组分之间存在直接或间接的相互作用,主要表现为植物对资源的竞争和互补利用。研究^[2]发现,间套作体系中存在明显的增产和养分的高效利用机制。黑麦草和玉米间作,黑麦草对土壤硝态氮的吸收比率提高,从而降低了硝态氮的淋溶损失,且间作玉米产量也维持在较高水平^[3]。小麦/蚕豆、小麦/玉米等间作模式中,氮高效作物显著促进氮低效作物对氮的吸收,从而改善了整个体系的氮营养状况^[4-5]。玉米和大豆间作影响了作物根系的生长,促进了玉米和大豆双方对磷的吸收、积累和利用^[6]。在果园生草复合系统中,牧草组分和果树组分存在负相竞争的同时,也对果树组分发挥着营养的促进作用,它们之间营养竞争和促进作用的机制是什么?因此,系统分析复合系统中物种间的相互作用和动态变化对各组分的影响,有助于进一步揭示复合系统中不同组分竞争/协同的形成机制和相应的生态过程,从而优化间作体系中养分资源的调控,减少化肥投入,降低环境风险。

研究^[7]表明,不同物种地下部根系竞争、互补及其动态变化对土壤水分、养分的吸收竞争起着重要作用,甚至在特定条件下,种间根系相互作用对作物生长和养分吸收的影响远大于地上部。根系分隔技术是研究复合系统中不同物种对养分竞争和促进作用的强弱,同时评价根区土壤残留养分差异的有效方法^[8]。过去引用根系分隔技术在不同农作物间作体系中进行了大量报道,但在果园生草模式中对各组分营养竞争与促进的互作机理的鲜有研究。白三叶和黑麦草分别为豆科和禾本科高产优质牧草,与农作物及林木间、套、复种的方式日益增多,尤其在果园有大面积栽培和利用。本研究通过设置苹果/白三叶及苹果/黑麦草间作栽培试验,采用 ^{15}N 示踪及根系分隔

技术,比较了间作两种牧草在苹果不同物候期对苹果植株生长和氮素吸收利用的差异,以期为进一步明确果园生草复合系统中氮素种间竞争、促进和高效吸收利用的作用机制,为优化调控果树和牧草间氮素营养吸收和利用,充分发挥间作优势,减少农药化肥投入提供理论依据,从而加快果园生草技术的推广与应用。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2017 年 3—9 月在山东农业大学园艺试验站防雨棚内进行。供试土壤为砂质壤土,土壤有机质含量 5.43 g/kg,全氮含量 0.43 g/kg,速效磷含量 26.13 mg/kg,速效钾含量 238.12 mg/kg。供试苹果幼苗为正常管理的两年生盆栽红富士苹果(*Malus domestica* Borkh. cv. Red Fuji)/平邑甜茶(*Malus hupenensis* Rhed.)幼苗,平均株高 47 cm,茎粗 3.6 mm。供试生草草种为白三叶(*Trifolium repens* Linn.)和黑麦草(*Lolium perenne* L.)。

采用根系分隔盆栽试验,3×2 二因素随机区组设计。盆高 43 cm,底部直径 32 cm,将盆从中间切割开,用聚氯乙烯粘合剂将尼龙网或塑料膜夹在中间,并用密封胶涂抹使其不漏水,把盆分隔为 2 室。土壤风干过 2 mm 筛后每室装土 7.5 kg,每盆 15 kg。

因素一为根系分隔方式,N1:塑料膜分隔(完全分隔),水、肥、根均不能通过,根系间无相互作用;N2:尼龙网分隔,根系虽被隔开,但根系间有养分和水分的交换;N3:根系不分隔,水、肥、根均可通过。因素二为栽培方式,M1:苹果/白三叶间作;M2:苹果/黑麦草间作。苹果、白三叶和黑麦草同时在 2017 年 3 月 12 日栽植、播种,每盆栽植一株苹果幼苗。施肥处理于 2017 年 3 月 20 日(萌芽期,各生长时期参照苹果大树)进行,各处理氮、磷、钾肥为尿素、过磷酸钙和硫酸钾,纯氮、 P_2O_5 、 K_2O 各 100 kg/hm²。同时每盆 2 室各土施 0.4 g¹⁵N 尿素(上海化工研究院生

产,丰度为 10.25%),每个处理重复 6 次,各处理每隔 7 天浇 1 次水,确保两个作物区的土壤湿度相同,且在作物适宜范围内进行常规管理,各处理生长条件和其他栽培管理保持一致。

分别于 5 月 13 日(新梢旺长期)和 9 月 16 日(落叶期)测定苹果株高和茎粗,并将苹果整株进行破坏性取样,解析为根、茎、叶。同时将苹果根区土壤全部取出,混匀后,按四分之一法则取 20 g 土,自然风干、研磨,过 100 目筛,装袋待测。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 植株解析样品测定方法 苹果植株样品按清水→洗涤剂→清水→1%盐酸→3 次去离子水顺序洗净后,105 ℃杀青 30 min,随后 80 ℃烘干至恒重,电磨粉碎后过 60 目筛,混匀后装袋备用,生物量以干质量计。样品全氮采用凯氏定氮法测定,¹⁵N 丰度在中国农业科学院原子能利用研究所采用 MAT-251 质谱仪(美国菲尼根公司)测定,土壤容重采用环刀法测定。

1.2.2 根系活力和根系形态指标的测定 苹果根系经清水冲洗后用透射扫描仪(ESPON Perfection V750)对样品进行扫描,获取苹果植株单株根系图像,再利用 WinRHIZO(Regent Instruments Inc.,加拿大)根系分析软件进行根系长度、根系表面积和根系体积分析,并计算每个样品根长密度。根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法测定,以单位鲜样质量根系还原的 TTC 量表示。

1.3 结果计算与数据处理

$Ndff$ (植株器官从肥料中吸收分配到的¹⁵N 量对该器官全氮量的贡献率,%)=(样品中¹⁵N 丰度-¹⁵N 自然丰度)/(肥料中¹⁵N 丰度-¹⁵N 自然丰度)×100%;氮肥利用率=[$Ndff$ ×器官全氮量(g)]/施氮

量(g)×100%;土壤质量(kg)=土壤体积(m³)×土壤容重(kg/m³);土壤全氮量(g)=土壤质量(g)×全氮含量(%);氮肥残留率= $Ndff$ ×土壤全氮量/施氮量(g)×100%;氮肥损失率=100%-氮肥利用率-土壤氮肥残留率。

本试验所有数据均采用 Excel 2003 进行统计分析和图表绘制,并利用 DPS 7.05 统计软件进行方差分析和 LSD 多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 根系分隔对不同复合体系下苹果植株生长的影响

从表 1 可以看出,在 M1 复合体系中,新梢旺长期苹果株高、茎粗和总干重均以 N3 处理最大,其次为 N2 处理,N1 处理最小,但各处理间差异未达显著水平($P>0.05$);在 M2 复合体系中,苹果各生长指标为 N1>N2>N3,且 N1 和 N2 处理下苹果总干重显著高于 N3 处理。N1 和 N2 处理下,间作两种牧草对苹果生长的影响差异均较小,而在 N3 处理下,M1 复合体系中苹果株高、茎粗和总干重分别比 M2 复合体系中高 16.93%,4.61%和 13.94%。

在 M1 复合体系中,与 N1 处理相比,苹果落叶期 N2 和 N3 处理下苹果总干重分别增加了 12.66%和 20.36%,M2 复合体系中其增幅分别为 8.33%和 13.92%。两种复合体系中苹果株高和茎粗也呈相同趋势,均为 N3>N2>N1,且各处理间差异达显著水平($P<0.05$)。说明种间根系相互作用促进了苹果植株的生长,且以 N3 处理的促进作用最为明显。N2 和 N3 处理下,M1 复合体系中苹果株高、茎粗和总干重均显著高于 M2 复合体系,表明白三叶对苹果生长的促进效果优于黑麦草。而在 N1 处理下苹果和牧草根系无相互作用,间作两种牧草对苹果生长的影响较小。

表 1 根系分隔和间作牧草对苹果植株株高、茎粗和总干重的影响

取样时期	处理	株高/cm		茎粗/mm		单株总干重/g	
		M1	M2	M1	M2	M1	M2
新梢旺长期	N1	64.32b(a)	65.07a(a)	5.93a(a)	6.01a(a)	45.66ab(a)	45.30a(a)
	N2	68.29ab(a)	64.21a(ab)	6.09a(a)	5.96a(a)	47.93a(a)	45.29a(ab)
	N3	71.35a(a)	61.02b(b)	6.13a(a)	5.86ab(b)	48.23a(a)	42.33b(b)
落叶期	N1	98.36c(a)	95.67c(a)	8.33c(a)	8.21c(ab)	71.83c(a)	71.90c(a)
	N2	105.69b(a)	101.33b(b)	8.98b(a)	8.62b(b)	80.93b(a)	77.89b(b)
	N3	115.67a(a)	108.38a(b)	9.54a(a)	9.14a(b)	86.61a(a)	81.91a(b)

注:同一时期同列不同字母表示差异达 0.05 显著水平,两种复合体系下同行括号内不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

2.2 根系分隔对不同复合体系下苹果植株根系形态的影响

在间作复合系统中,植物根系可通过调节其形态和生理可塑性来适应土壤环境的变化^[9]。从表 2 可以看出,新梢旺长期,在 M1 复合体系中,N3 和 N2 处理下苹果根长密度分别是 N1 处理的 1.19,1.05 倍,根长和根表面积趋势相同;在 M2 复合体系中,根

长、根长密度和根表面积表现为 N1>N2>N3。在 N2 处理下,M1 复合体系中苹果根长密度显著高于 M2 复合体系,苹果根长和根表面积在两种复合体系中无显著差异($P>0.05$)。在 N3 处理下,M1 复合体系中苹果根长、根长密度和根表面积分别为 M2 复合体系的 1.03,1.19,1.08 倍。表明此时黑麦草和苹果根系互作对苹果根系的生长表现出一定的抑制作用。

苹果落叶期, M1 复合体系中 N2 和 N3 处理苹果根长密度分别比 N1 处理增加了 19.42% 和 41.99%, 在 M2 复合体系其增幅分别为 11.61% 和 26.66%。两种复合体系中苹果根长和根表面积趋势相同。表明此时苹果和牧草互作, 苹果根系表现出明显的形态可塑性, 通过扩大根系吸收空间, 促进根

系生长。不同根系分隔方式下间作不同牧草对苹果根系生长的影响差异较大。N3 处理下, M1 复合体系中苹果根长、根长密度和根表面积分别是 M2 复合体系的 1.05, 1.09, 1.06 倍, N2 处理趋势相同。而在 N1 处理中, 间作两种牧草苹果根系形态指标差异不显著($P>0.05$)。

表 2 根系分隔和间作牧草对苹果植株根长、根长密度和根表面积的影响

取样时期	处理	根长/cm		根长密度/(cm·cm ⁻³)		根表面积/cm ²	
		M1	M2	M1	M2	M1	M2
新梢旺长期	N1	1116.32b(a)	1126.13a(a)	87.13b(a)	93.91a(ab)	344.26ab(a)	353.21a(a)
	N2	1131.69ab(a)	1122.01a(a)	97.92a(a)	91.10a(b)	357.63a(a)	349.29a(a)
	N3	1140.35a(a)	1108.82ab(b)	103.29a(a)	86.86b(b)	366.23a(a)	338.91b(b)
落叶期	N1	1609.60c(a)	1599.14c(ab)	120.49c(a)	123.80c(a)	479.46c(a)	486.12c(a)
	N2	1866.60b(a)	1729.48b(b)	143.89b(a)	138.17b(ab)	553.66b(a)	524.00b(b)
	N3	1986.26a(a)	1896.75a(b)	171.08a(a)	156.81a(b)	613.02a(a)	576.42a(b)

2.3 根系分隔对不同复合体系下苹果植株根系活力的影响

根系活力大小直接影响植物矿质元素的吸收和地上部的生长。一般情况下, 根系活力越高, 植株吸收养分的能力越强。从图 1 可以看出, 新梢旺长期, 在 M1 复合体系中, 和 N3 处理相比, N2 和 N1 处理下苹果根系活力分别降低了 8.86% 和 20.92%, N2 和 N3 处理间差异不显著($P>0.05$); 而在 M2 复合体系中, N2 和 N1 处理苹果根系活力无显著差异($P>0.05$), 但比 N3 处理分别增加了 12.12% 和 9.49%。N2 和 N3 处理下, M1 复合体系中苹果根系活力均高于 M2 复合体系, 而 N1 处理下间作两种牧草对苹果根系活力的影响无显著差异($P>0.05$)。表明此时苹果和牧草根系相互作用越大, 白三叶越可提高苹果的根系活力, 而黑麦草则越抑制其根系活力。苹果落叶期, 间作两种牧草对苹果根系活力的影响规律一致, 均为 N3>N2>N1, 各处理间差异显著($P<0.05$)。在 N2 和 N3 两种根系分隔方式下, M1 复合体系中苹果根系活力分别是 M2 复合体系的 1.15, 1.06 倍, 但在无根系相互作用的 N1 处理下无显著差异($P>0.05$)。表明随时间推移, 牧草通过和苹果根系互作可增大苹果根系活力, 且白三叶对苹果根系活力的提高效果优于黑麦草。

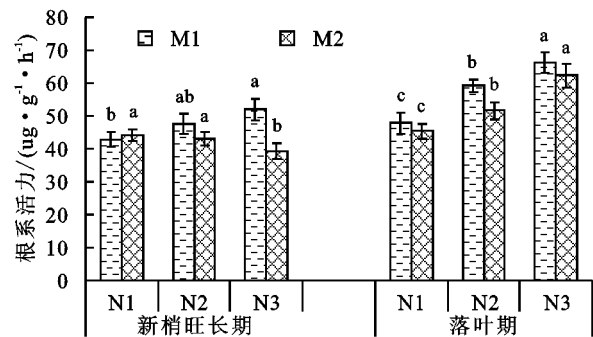
2.4 根系分隔对不同复合体系下苹果植株各器官 Ndff 的影响

植株器官从肥料中吸收分配到的¹⁵N 量对该器官全氮量的贡献率(Ndff)反映了植株器官对肥料¹⁵N 的吸收征调能力^[10]。由表 3 可知, 新梢旺长期, 以根系的 Ndff 值最高, 茎和叶片 Ndff 值均较低。表明此时根系对¹⁵N 的吸收征调能力最强, 而地上部器官建造对肥料氮的需求还较少。在 M1 复合体系中, 根系和茎部的 Ndff 值均为 N3>N2>N1, 但茎部 Ndff 值在各根系分隔方式间差异不显著($P>0.05$)。在 M2 复合体系中, 则为 N1>N2>N3。两种复合体系下 3 种根系分隔方式下叶片 Ndff 值均无显著差异($P>0.05$)。在 N2 和 N3 处理下, M1 复合体系中根系 Ndff 值分别比 M2 复合体系中高 17.81% 和 27.54%, 茎部和叶片 Ndff 值在两种复合体系中差异未达显著水平($P>0.05$)。

苹果落叶期, 苹果各器官特别是叶片的 Ndff 值显著增大, 且各处理下 Ndff 值均为叶>根>茎。两种复合体系下不同根系分隔方式对苹果各器官 Ndff 值影响规律一致, 均以 N3 处理最高, N2 处理次之, N1 处理最低, 说明根系相互作用提高了苹果各器官对肥料氮的吸收征调能力, 促进了对肥料氮的吸收利用, 且以 N3 处理效果最为明显。在 M1 复合体系中, N2 和 N3 处理下苹果根系和茎部 Ndff 值均显著高于 M2 复合体系, 其中根系增幅分别为 9.35% 和 12.05%, 茎部增幅分别为 10.10% 和 13.45%。对叶片, N3 处理下 M1 复合体系显著高于 M2 间作体系, 在 N2 处理下两种复合体系中差异不显著($P>0.05$)。而对无根系相互作用的 N1 处理, 两种复合体系中苹果各器官 Ndff 值均无显著差异($P>0.05$)。

2.5 根系分隔对不同复合体系下苹果植株全氮量及¹⁵N—尿素吸收、利用的影响

从表 4 可以看出, 新梢旺长期, 在 M1 复合体系中,



注:同一时期柱上不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

图 1 根系分隔和间作牧草对苹果根系活力的影响

均以 N3 处理的苹果全氮量、¹⁵N 吸收量和¹⁵N 利用率最大,分别为 0.49 g,13.02 mg 和 7.09%,其次为 N2 处理,N1 处理最低,且¹⁵N 吸收量和¹⁵N 利用率在各根系分隔处理间差异显著($P<0.05$)。在 M2 复合体系中,苹果全

氮量、¹⁵N 吸收量和¹⁵N 利用率则均为 N1>N2>N3,但 N2 和 N3 处理间差异不显著($P>0.05$)。N2 和 N3 处理下,M1 复合体系中苹果全氮量、¹⁵N 吸收量和¹⁵N 利用率均显著高于 M2 复合体系。

表 3 根系分隔和间作牧草对苹果植株各器官 Ndff 的影响

取样时期	处理	根		茎		叶	
		M1	M2	M1	M2	M1	M2
新梢旺长期	N1	0.74b(a)	0.77a(a)	0.46ab(a)	0.47a(a)	0.43a(a)	0.40a(a)
	N2	0.86a(a)	0.73ab(b)	0.49a(a)	0.46a(ab)	0.46a(a)	0.43a(a)
	N3	0.88a(a)	0.69b(b)	0.51a(a)	0.44ab(ab)	0.47a(a)	0.43a(ab)
落叶期	N1	1.82c(a)	1.79c(a)	1.56c(a)	1.52c(a)	2.49c(a)	2.47c(a)
	N2	2.34b(a)	2.14b(b)	2.29b(a)	2.08b(b)	3.15b(a)	2.89b(ab)
	N3	2.79a(a)	2.49a(b)	2.53a(a)	2.23a(b)	3.50a(a)	3.23a(b)

苹果落叶期,两种复合体系中苹果总氮量均以 N3 处理最高,N1 处理最低。与 N1 处理相比,在 M1 复合体系中,N2 和 N3 处理下苹果¹⁵N 吸收量分别增加了 21.86%和 38.39%。M2 复合体系中其增幅分别为 12.69%和 31.49%,¹⁵N 利用率趋势相同。N1 处理下,两种复合体系下苹果对氮素的吸收利用

无显著差异($P>0.05$),而在 N2 和 N3 处理下,其在 M1 复合体系中均显著高于 M2 复合体系。表明根系相互作用在增加苹果全氮量和¹⁵N 吸收量同时,提高了苹果¹⁵N 利用率,且根系完全相互作用的效果显著大于部分根系相互作用,间作白三叶其效果优于黑麦草。

表 4 根系分隔和间作牧草对苹果植株总氮量、¹⁵N 吸收量和¹⁵N 利用率的影响

取样时期	处理	全氮量/g		单株 ¹⁵ N 吸收量/mg		¹⁵ N 利用率/%	
		M1	M2	M1	M2	M1	M2
新梢旺长期	N1	0.37b(a)	0.38a(a)	11.56c(a)	11.70a(a)	5.96c(a)	6.06a(a)
	N2	0.44a(a)	0.36a(b)	12.19b(a)	11.23b(b)	6.67b(a)	5.73b(b)
	N3	0.49a(a)	0.33ab(b)	13.02a(a)	10.96bc(b)	7.09a(a)	5.56b(b)
落叶期	N1	0.63c(a)	0.60c(a)	17.61c(a)	17.34c(a)	9.26c(a)	9.52c(a)
	N2	0.80b(a)	0.74b(b)	21.46b(a)	19.54b(b)	11.03b(a)	10.11b(b)
	N3	0.94a(a)	0.83a(b)	24.37a(a)	22.80a(b)	13.21a(a)	12.31a(b)

2.6 根系分隔对不同复合体系下苹果根区土壤中¹⁵N%丰度和总 N 含量的影响

从图 2 可以看出,新梢旺长期,两种复合体系中苹果根区土壤¹⁵N%丰度和总 N 含量均为 N1>N2>N3。但在 M1 复合体系中,3 种根系分隔处理间差异不显著($P>0.05$);在 M2 复合体系中 N1、N2 和 N3 处理下其土壤¹⁵N%丰度差异均达显著水平($P<0.05$)。与新梢旺长期规律相反,苹果落叶期,两种复合体系

下,苹果根区土壤¹⁵N%丰度为 N3>N2>N1,且各根系分隔处理间差异显著($P<0.05$)。M1 复合体系中,N2 和 N3 处理下苹果根区土壤总氮含量分别是 N1 处理的 1.11,1.23 倍,M2 复合体系中分别为 1.09,1.14 倍。进一步对比两种复合体系的差异可知,M1 复合体系中 N3 和 N2 处理下苹果根区土壤¹⁵N%丰度显著高于 M2 复合体系,在 N1 处理中无显著差异($P>0.05$),土壤总氮含量也呈相同趋势。

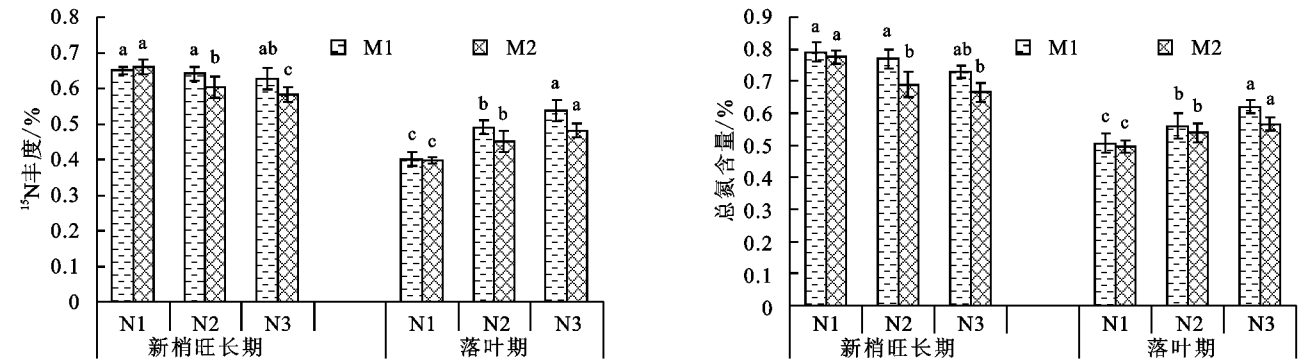


图 2 根系分隔和间作牧草对苹果根区土壤中¹⁵N%丰度和总 N 含量的影响

2.7 根系分隔对不同复合体系下苹果根区土壤¹⁵N 残留和损失的影响

从表 5 可以看出,新梢旺长期,施入苹果根区土壤中的肥料氮主要以残留的形式累积在土壤中。两种复合体系中,苹果根区土壤¹⁵N 残留量和¹⁵N 残留率均以 N1 处理最高,其次为 N2 处理,N3 处理最低。但在 M1 复合体系中,N1、N2 和 N3 处理间差异不显著($P>0.05$),在 M2 复合体系中差异均达显著水平($P<0.05$)。苹果根区¹⁵N 损失率则为 $N3>N2>N1$,在 M1 复合体系中 3 种根系分隔处理间差异不显著($P>0.05$)。在 M2 复合体系,N2 和 N3 处理显著高于 N1 处理。在 N2 和 N3 处理下,M1 复合体系中苹果根区土壤¹⁵N 残留量和¹⁵N 残留率显著高于 M2 复合体系,而苹果根区¹⁵N 损失率与之呈相反趋势。

苹果落叶期,施入苹果根区土壤中的肥料氮的损

失率大于残留率,且两种复合体系中不同根系分隔方式对苹果根区土壤¹⁵N 残留量和¹⁵N 残留率影响规律一致。M1 和 M2 复合体系中苹果根区土壤中¹⁵N 残留量均以 N3 处理最多,相应的分别是 N1 处理的 1.44,1.34 倍,其次为 N2 处理,苹果根区土壤¹⁵N 残留率趋势相同。与¹⁵N 残留量和¹⁵N 残留率趋势相反,M1 复合体系中 N2 和 N3 处理下苹果根区土壤¹⁵N 损失率分别比 N1 处理低 13.55%和 27.12%,在 M2 复合体系中则分别降低了 6.82%和 17.21%。N2 和 N3 处理下,M1 复合体系苹果根区土壤¹⁵N 残留量和¹⁵N 残留均显著高于 M2 复合体系,¹⁵N 损失率则呈相反趋势。说明随时间推移,白三叶、黑麦草和苹果根系相互作用在促进苹果植株对肥料氮的吸收利用的同时,还有利于土壤肥力的保持,且与白三叶间作效果优于黑麦草。

表 5 根系分隔和间作对苹果根区土壤¹⁵N 残留量、¹⁵N 残留率和¹⁵N 损失率的影响

取样时期	处理	¹⁵ N 残留量/mg		¹⁵ N 残留率/%		¹⁵ N 损失率/%	
		M1	M2	M1	M2	M1	M2
新梢旺长期	N1	249.34a(a)	253.37a(a)	65.46a(a)	65.92a(a)	28.71ab(a)	28.02b(a)
	N2	236.36ab(a)	220.71b(b)	61.89ab(a)	57.83b(b)	31.13a(b)	36.54a(a)
	N3	223.89b(a)	209.61c(b)	58.76b(a)	54.39c(b)	33.75a(b)	39.25a(a)
落叶期	N1	103.39c(a)	97.11c(a)	28.82c(a)	27.69c(a)	61.92a(a)	62.79a(a)
	N2	128.04b(a)	117.12b(b)	34.43b(a)	31.11b(b)	54.53b(b)	58.78b(a)
	N3	149.31a(a)	130.30a(b)	38.26a(a)	34.12a(b)	48.71c(b)	53.57c(a)

3 讨论

果园生草复合系统中,牧草和果树组分竞争和促进作用并存。苹果和牧草共同生长阶段,从苹果萌芽期到新梢旺长期,苹果氮素需求的主要来源是贮藏氮,对土壤及肥料氮的需求较少,此期大量施氮超过树体实际需求量不仅造成氮素资源的浪费,且不利于当年的开花坐果^[11]。而此期正值牧草的生长盛季,对土壤养分的吸收和光的利用都达到了峰值。本试验条件下,苹果新梢旺长期两种牧草对苹果生长和养分吸收的影响效果不同。在苹果和黑麦草复合体系中,与根系完全分隔相比,尼龙网和不分隔处理下苹果根系 Ndff 值分别降低了 5.48%和 11.59%,苹果根区土壤¹⁵N 丰度和植株¹⁵N 吸收量也呈降低的趋势,表明此时根系相互作用下,黑麦草竞争吸收了部分苹果根区的氮素养分,对苹果以负相竞争为主,且竞争强度随根系相互作用的增大而提高,因而根系不分隔处理下苹果株高和总干重均低于根系完全分隔处理。而在白三叶和苹果复合体系中,根系尼龙网和不分隔处理下苹果¹⁵N 吸收量分别比根系完全分隔处理增加了 5.45%和 12.63%,苹果全氮量和¹⁵N 利用率趋势相同,苹果根区土壤¹⁵N 丰度和全氮含量在

各根系分隔处理间差异不显著。说明白三叶和苹果根系相互作用越大,越体现出对苹果养分吸收的促进作用。但此时白三叶对苹果营养生长的促进作用较小,苹果株高、茎粗和总干重在根系分隔处理间差异均不显著。

农林复合系统中树木和作物根系的分布特征对整个系统的持续性发展具有重要的影响^[12]。苹果新梢旺长期,苹果和白三叶复合体系中,根系尼龙网和不分隔处理下苹果根长密度显著大于根系完全分隔,在苹果和黑麦草复合系统中与之呈相反趋势。究其原因,可能与此时为牧草根系快速生长期,相对于白三叶,黑麦草根系较发达,根系生物量消减系数较大,在对土壤养分的竞争中暂时占据优势,因而此时根系互作越大在一定程度上越不利于苹果根系扩张。而白三叶根系消减系数较小,与果树根系呈镶嵌分布,不会抑制苹果根系生长^[13]。一般情况下,果树根系的发生高峰与枝叶的生长高峰互错,这是地上部和地下部争夺有机养分的结果^[14]。新梢旺长期,新定植的苹果幼树根系发生量较少,此时两种牧草对苹果根系生长所体现出的互作效果还较小,因而两种复合体系中不同根系分隔方式下苹果根长和根表面积间的

差异均不显著。

研究^[15]发现,随种间互作时间的延长,各组分根系可不断调节自身形态结构来稳定地支撑和维护所占据的生态位。桑园间作大豆,桑树的根长密度和根干重分别比单作时增加了139.8%和24.8%^[16]。Dawson等^[17]发现,草本植物根系的竞争使野樱桃根系的平均分布深度随时间而增加。随互作时间的推移,在苹果落叶期两种复合体系中,根系尼龙网和不分隔处理下苹果根系形态各参数均显著高于根系完全分隔,说明此时白三叶和黑麦草均对苹果根系生长产生了较强的正效应。对牧草根系特征研究^[13]发现,0—20 cm土层为大多牧草根系生物量和根系密集分布区,而地表下15—40 cm为苹果根系密集分布层^[18],说明牧草和苹果间作产生空间生态位上的互补,使得苹果根系在中、深土层中仍有较大的生态位宽度。苹果新梢停长期后,苹果根系发生量迅速增加,牧草生长则逐渐趋于缓慢,此时苹果根系的生长逐渐占据优势。根系互作一方面扩展了苹果根系空间生态位宽度,其次牧草通过根分泌的方式向根周围释放出各种化合物,产生的根际效应可能也促进了苹果根系的生长。根系活力测定结果也表明,牧草和苹果根系互作越大,苹果根系活力越高,从而可进一步增强苹果吸收养分的能力,提高苹果在复合系统中的竞争力,促进体系的稳定。这与李会科等^[19]在苹果/白三叶和王树起等^[20]在水稻/花生间作复合系统中的研究结果类似。

已有研究^[21]表明,间作有利于促进作物增产,提高作物氮素吸收利用效率。苹果新梢旺长期后,贮藏养分再利用结束,树体开始从土壤中大量吸氮。而此期过后牧草生长逐渐趋于缓慢,对土壤养分需求量降低,从而和苹果在对养分的吸收高峰期上不相重叠,产生了时间生态位的互补。苹果落叶期¹⁵N示踪发现,两种复合体系下根系尼龙网和不分隔处理下苹果根区土壤中¹⁵N%丰度和总氮含量显著高于完全分隔处理,土壤¹⁵N残留量趋势一致,且其以不分隔处理最高,说明牧草和苹果根系互作越大越有利于土壤肥力的保持。氮素在土壤中移动性较大,加之本试验用土质地偏砂,导致完全分隔处理苹果根区土壤中氮素因灌溉和淋失等途径损失较大。而牧草对土壤养分的吸附作用可在一定程度上减弱氮素淋溶、挥发等损失。牧草生长盛季能很好吸收土壤中累积的氮肥并转化为自身体内物质,在牧草缓慢生长期,牧草残体中累积的氮素缓慢释放到土壤中^[22]。根系互作下,牧草根区土壤中含氮养分可发生扩散迁移或通过根

系分泌的方式将根际沉淀物转移到与之间作的苹果吸收利用^[19]。因此,牧草对土壤养分的这种吸附和解吸特性降低了氮素损失,间接的保障了苹果需氮期氮素的稳定、充足供应。另外,两种牧草和苹果根系互作促进了苹果根系生长,增大了苹果根系活力从而进一步促进了苹果对氮素的吸收,提高了苹果的氮素利用率,且根系互作越大效果越显著。至苹果落叶期,在苹果和白三叶复合体系中,与根系完全分隔处理相比,根系尼龙网和不分隔处理下苹果¹⁵N利用率分别增加了19.11%和42.66%,而¹⁵N损失率分别降低了13.55%和27.12%,苹果和黑麦草复合体系中呈相同趋势,但其对苹果氮素吸收利用的促进效果低于白三叶。

进一步比较两种牧草对苹果氮营养促进作用的差异可知,白三叶为豆科牧草,本身具有固氮作用,研究表明豆科可通过根系分泌相当数量的氮化合物^[23],这些化合物可能以氨基酸、细胞溶解物、脱落物及 NH_4^+ 、 NO_3^- 等形态在根际淀积^[24-25]。在本试验中,根系尼龙网特别是不分隔处理下苹果竞争吸收形成苹果和白三叶土壤中氮素浓度梯度,可能会进一步促进这些氮化合物向苹果根区迁移,白三叶根区土壤有效氮随之降低,从而促进了白三叶更多的固定空气氮,进一步减少了对土壤氮素的消耗。加之白三叶对土壤肥力的保持作用,使得苹果和白三叶复合体系中根系不分隔和尼龙网分隔下苹果根区土壤中¹⁵N丰度和总氮含量均高于苹果和黑麦草复合体系。另外,白三叶对苹果根系活力和根系生长的促进作用也优于黑麦草,因而苹果和白三叶根系互作最有利于苹果氮素吸收和营养生长。黑麦草为禾本科牧草,虽不像白三叶和苹果通过种间互惠实现氮素的高效利用,但其与苹果根系互作可能也存在氮素的转移作用,刺激或诱导了苹果对氮的竞争吸收^[26],且黑麦草在生长后期对土壤养分的吸附和解吸作用在一定程度上也减弱了土壤氮素的损失,间接保障了苹果对氮素的需求,从而促进了苹果氮素吸收,改善了苹果的营养生长。

4 结论

(1)苹果新梢旺长期,在苹果和黑麦草复合体系中,根系不分隔处理下苹果总干重显著低于根系完全分隔和尼龙网分隔处理。在苹果和白三叶复合体系中,3种根系分隔方式下苹果各生长指标差异不显著。与根系完全分隔相比,苹果和和白三叶复合体系中,根系尼龙网和不分隔处理下苹果¹⁵N利用率分别增加了11.91%和18.96%,在苹果和黑麦草复合体系中分别降低了5.76%和8.99%,苹果全氮量和¹⁵N

吸收量趋势相同。表明此时根系相互作用下黑麦草和苹果以负相竞争为主,对苹果氮素吸收和营养生长表现出一定的抑制作用,白三叶则对其表现出一定的促进作用,但其促进效果不显著。

(2)随互作时间的延长,至苹果落叶期,两种牧草和苹果互作,一方面拓展了苹果根系的空间生态位宽度,提高了苹果根系活力,促进了苹果根系的生长;另一方面,两种牧草和苹果在对土壤养分吸收高峰期上的互错产生了时间生态位的互补,牧草对土壤养分的吸附与解吸特性又降低了苹果根区土壤氮素的损失,保障了苹果需氮期氮素的稳定、充足供应,从而促进了苹果植株对氮素的吸收利用,进一步促进了其营养生长,且根系相互作用越大,其促进效果越显著,并以间作白三叶效果为最佳。

参考文献:

- [1] 李芳东,吕德国,秦嗣军,等.生草覆盖对苹果展叶过程中光合特性的影响[J].草业科学,2014,31(3):462-467.
- [2] 李玉英,胡汉升,程序,等.种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响[J].生态学报,2011,3(6):1617-1630.
- [3] Zhou X M, Madramootoo C A, Mackenzie A F, et al. Corn yield and fertilizer N recovery in water-table-controlled corn-rye-grass systems[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 12(2): 83-92.
- [4] 肖焱波,李隆,张福锁.小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J].中国农业科学,2005,38(5): 965-973.
- [5] 丁世杰,熊淑萍,马新明,等.耕作方式与施氮量对小麦—玉米复种系统玉米季土壤氮素转化及产量的影响[J].应用生态学报,2017,28(1):142-150.
- [6] 张雷昌,汤利,郑毅.根系互作对玉米大豆间作物磷吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1142-1149.
- [7] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. Oecologia, 2006, 147(2): 280-290.
- [8] Yang F, Liao D P, Wu X L, et al. Effect of aboveground and belowground interactions on the intercrop yields in maize-soybean relay intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 16-23.
- [9] 杜静,范茂攀,王自林,等.米—马铃薯间作根系特征及其与坡耕地红壤径流养分流失的关系[J].水土保持学报,2017,31(1):55-60.
- [10] 房祥吉,姜远茂,彭福田,等.不同沙土配比对盆栽平邑甜茶的生长及¹⁵N吸收、利用和损失的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):131-134.
- [11] 彭福田,姜远茂,顾曼如,等.落叶果树氮素营养研究进展[J].果树学报,2003,20(1):54-58.
- [12] Andersen M K, Hauggaard-Nielsen H, Weiner J, et al. Competitive dynamics in two- and three-component intercrops[J]. Journal of Applied Ecology, 2007, 44(3):545-551.
- [13] 李会科,郑秋玲,赵政阳,等.黄土高原果园种植牧草根系特征的研究[J].草业学报,2008,17(2):92-96.
- [14] 姜远茂,张宏彦,张福锁.北方落叶果树养分资源综合管理理论与实践[M].北京:中国农业大学出版社,2007:67-68.
- [15] Xia H Y, Zhao J H, Sun J H, et al. Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates[J]. Field Crops Research, 2013, 150(15): 52-62.
- [16] 郑晓媛,赵莉,许楠,等.桑树大豆间作地上部和地下部的种间作用研究[J].土壤,2011,43(3):493-497.
- [17] Dawson L A, Duff E I, Campell C D, et al. Depth distribution of cherry (*Prunus avium* L.) tree roots as influenced by grass root competition[J]. Plant and Soil, 2001, 231(1): 11-19.
- [18] 杨洪强,束怀瑞.苹果根系研究[M].北京:科学出版社,2007:35.
- [19] 李会科,李金玲,王雷存,等.种间互作对苹果/白三叶复合系统根系生长及分布的影响[J].草地学报,2011,19(6):960-968.
- [20] 王树起,沈其荣,褚贵新,等.种间竞争对旱作水稻与花生间作系统根系分布和氮素吸收积累的影响[J].土壤学报,2006,43(5):860-863.
- [21] Fang G, Wen Y, Yu H, et al. On yield gaps and yield gains in intercropping: Opportunities for increasing grain production in northwest China[J]. Agricultural Systems, 2017, 151: 96-105.
- [22] 郑涛,李发林,黄炎和,等.套种不同牧草的果园土壤对铵的吸附特性研究[J].热带作物学报,2012,33(6): 1009-1013.
- [23] Brophy L S, Heichel G H. Nitrogen release from roots of alfalfa and soybean grown in sand culture[J]. Plant and Soil, 1989, 116(1): 77-84.
- [24] Paynel F, Murray P J, Cliquet J B. Root exudates: A pathway for short-term N transfer from clover and ryegrass[J]. Plant and Soil, 2001, 229(2): 235-243.
- [25] 姜圆圆,郑毅,汤利,等.豆科禾本科作物间作的根际生物过程研究进展[J].农业资源与环境学报,2016,33(5):407-415.
- [26] 雍太文,杨文钰,任万军,等.两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用[J].中国农业科学,2009,42(9): 3170-3178.