

张昌琦,付中法,陈 升,等. 长期不同驯化土壤遗留效应初探[J]. 江苏农业科学,2025,53(3):182-190.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.03.025

# 长期不同驯化土壤遗留效应初探

张昌琦<sup>1</sup>, 付中法<sup>1</sup>, 陈 升<sup>1</sup>, 余玉梅<sup>1</sup>, 朱映安<sup>1,2</sup>, 肖靖秀<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650500; 2. 云南农业大学园林园艺学院, 云南昆明 650500)

**摘要:**为揭示土壤遗留效应在间作提高或维持系统生产力的机制中的作用,以田间施氮和不施氮水平下单作小麦、单作蚕豆和小麦蚕豆间作的长期驯化土壤开展盆栽试验,分析不同驯化土壤下小麦和蚕豆生长参数、根系形态及氮吸收的差异。结果表明:与同作土壤相比,异作土壤和间作土壤提高了小麦株高和叶片 SPAD 值,促进小麦根系形态生长,使根系变长 50.0% 和 75.9%,小麦根系表面积分别增加了 22.7% 和 27.6%;而蚕豆在异作土壤和不施氮的间作土壤条件下其根系分别变长 55.9% 和 36.0%、变细 13.4% 和 26.9%。与同作土壤相比,异作土壤提高了小麦地上部氮吸收量,间作土壤则主要提高了小麦和蚕豆地下部氮吸收量,分别为 20.2% 和 35.3%。施用氮肥降低了异作土壤和间作土壤的促进效应,不施氮时促进效应表现为间作土壤 $\geq$ 异作土壤,施氮条件下表现为间作土壤 $<$ 异作土壤。综上,异作土壤(轮作)和间作均能带来正向的遗留效应,不施氮的条件下,间作对后茬作物的促生遗留效应大于或等于异作土壤(轮作),施氮抑制了间作和异作土壤(轮作)的正向遗留效应。

**关键词:**单作;间作;土壤遗留效应;反馈效应;小麦;蚕豆

**中图分类号:**S344 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)03-0182-09

土壤遗留效应是植物-土壤反馈中的一部分,是目前生态研究的热点之一。土壤遗留效应可以理解在植物生长过程中通过根系穿插、分泌物和凋落物与土壤进行养分循环,改变土壤的物理结构、化学性质和养分组成,而这些被植物改变的因素会在剔除植物后继续留在土壤中,对后茬植物的生长产生影响<sup>[1-2]</sup>。Nsikani 等发现,金合欢入侵改

变土壤特性[pH 值、硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )含量],并且在消除金合欢后的 10 年,其土壤特性仍然保持生态功能<sup>[3]</sup>。如果植物造成的土壤遗留物质对后茬同种植物本身体现出生长优势则称为正反馈,若对同种植物自身生长产生抑制作用则称为负反馈,对植物自身生长既不促进也不抑制可定义为中性反馈<sup>[4-5]</sup>。土壤遗留物质会对生态系统中优势物种产生影响,从而影响生态系统的物种多样性和系统生产力<sup>[6-7]</sup>。

首先,连作障碍是农田生态系统中最典型的一种负反馈现象,也是植物-土壤反馈理论最早在农田生态系统中的应用,并且在农田生态系统中这种负反馈往往会比自然生态系统中更强烈<sup>[8]</sup>。连续的单一种植和肥料的大量投入导致作物减产等问题的出现,人们开始思考作物与土壤环境之间的联

收稿日期:2023-01-23

基金项目:国家自然科学基金(编号:32060718,31760611);云南农业联合专项面上项目(编号:202301BD070001-201);国家重点研发计划(编号:2022YFD1901502)。

作者简介:张昌琦(1999—),女,云南曲靖人,硕士研究生,主要从事间套作体系养分资源高效利用研究。E-mail:2429691218@qq.com。

通信作者:肖靖秀,博士,教授,主要从事间套作体系养分资源高效利用、植物营养与病害控制研究。E-mail:xiaojingxiuxjx@126.com。

(PET) bottled mineral water using a simple and rapid analytical method[J]. Food Chemistry,2021,344:128708.

[19]徐继松,翟少伟,许 璐,等. 衍生化反相高效液相色谱法检测水产品中的甲醛残留量[J]. 食品工业,2019,40(10):299-303.

[20]顾亚萍,乔 方,方长发,等. 液相色谱串联质谱法测定白菜中的甲醛含量[J]. 食品与发酵工业,2017,43(12):214-217.

[21]马庆国,徐锦宏,贺 伟,等. 2,4-二硝基苯肼衍生化甲醛条件探讨[J]. 山东化工,2018,47(21):15-17.

[22]李 颖,赵浩军,刘 飞,等. 2,4-二硝基苯肼柱前衍生-高效液相色谱法测定水中的微量乙醛[J]. 食品安全质量检测学报,2019,10(16):5523-5527.

[23]洪月玲,袁 野,胡潇潇. 柱前衍生-高效液相色谱法测定水产品中甲醛含量的研究[J]. 微量元素与健康研究,2019,36(5):59-61.

[24]江 颖,王 珏,许 凯,等. HPLC 柱前衍生化法测定药用辅料中甲醛、乙醛时空白干扰的探索及方法优化[J]. 药物分析杂志,2020,40(11):2062-2069.

系<sup>[9-11]</sup>。研究证实,单一作物连续种植产生的化感物质积累是负反馈的主要因子<sup>[12]</sup>。其次,长期连作导致作物根际微生物群落结构单一、功能特定化,有益微生物数量减少,有毒病原体积累从而对后茬作物的生长产生影响<sup>[13]</sup>。再者,过量施肥造成的养分利用率低下和养分离子的拮抗加剧了土壤环境的恶化<sup>[14]</sup>。因此,如何优化种植制度和肥料的投入,对减缓连作负反馈有着重要意义。

轮作、间作等多样性种植通过资源互补和生态位分化<sup>[15]</sup>,可以明显改善连作障碍,提高土壤养分<sup>[16-17]</sup>以及作物的生物量和产量。作物轮作通过根系穿插土壤、分泌根系分泌物等,促进土壤养分的活化,改善土壤物理结构,从而影响后茬作物的生长环境和养分利用<sup>[18-19]</sup>。此外,轮作中前茬作物的不同造成土壤环境差异,直接影响作物根系的性状和功能<sup>[20]</sup>。如大豆与玉米和油菜轮作能够改善土壤的透气性和孔隙度,促进大豆、玉米、油菜根系的发育,提高土壤根系活跃度和固持能力,提高作物对土壤养分的吸收能力<sup>[21-22]</sup>。再者,不同轮作模式的土壤性质和前茬作物能直接影响土壤中氮素的有效性,进而影响根系和地上部的生长以及对氮素的吸收<sup>[23]</sup>。总之,土壤遗留效应较好地解释了轮作的重要性,但是间作土壤遗留效应分析尚未引起足够重视。

土壤微生物、动物、养分是植物-土壤反馈的驱动因素<sup>[18]</sup>,利用植物-土壤反馈理论人们很好地解释了自然生态系统中植物入侵、群落演替等自

然现象<sup>[24-25]</sup>。近年来,人们开始关注农田生态系统中土壤微生物遗留效应,但从植物-土壤反馈理论探讨农田生态系统生产力和稳定性的研究尚未引起足够重视。豆科禾本科间作具有增产控病、节约氮肥的优势,能够维持或者提高系统生产力。前人大量的研究主要从种间-种内相互作用、地上部-地下部相互作用的角度,系统揭示了间作优势形成的机制,但是很少有研究从植物-土壤反馈原理出发分析间作优势。本研究基于小麦蚕豆间作田间定位试验,分析长期驯化的单作和间作土壤对作物地上部和地下部生长及养分吸收的影响,旨在进一步揭示间作在维持和提高系统生产力方面的贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况与材料

本试验供试土壤来自始于 2014 年云南省昆明市寻甸县大河桥农场云南农业大学现代农业教育实践基地(23°32'N,103°13'E)连续种植 8 年的田间定位试验土壤,土壤为熟化程度较高的耕作红壤。田间定位试验为 2 因素试验设计,A 为 4 个氮水平:0、90、180、270 kg/hm<sup>2</sup>,B 为 3 种植模式:小麦单作、蚕豆单作、小麦蚕豆间作。磷钾肥施用量都为 90 kg/hm<sup>2</sup>。本试验所用不同供试土壤为田间定位试验 2020 年 10 月至 2021 年 5 月收获后 20 d 且施氮量为 0、180 kg/hm<sup>2</sup> 下小麦单作、蚕豆单作、小麦蚕豆间作 0~20 cm 的风干土壤。不同供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 不同供试土壤基本理化性质

定位试验施氮量 (kg/hm <sup>2</sup> )	种植模式	pH 值	有机碳含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
0	W	7.2	18.20	85.87	19.33	137.97
	F	7.21	18.53	86.22	16.67	128.30
	I	7.28	19.72	92.21	23.67	129.00
180	W	7.12	18.75	95.98	17.67	125.23
	F	7.23	18.18	94.83	18.33	125.67
	I	7.31	20.14	98.93	20.33	124.15

注:W、F、I 分别指单作小麦、蚕豆单作、小麦和蚕豆间作。

### 1.2 试验设计

本试验在云南农业大学后山资源与环境学院温室大棚内进行,大棚中的平均温度 12.2℃,平均湿度 72.6%。

本试验为盆栽试验,将田间定位试验施氮量为 0、180 kg/hm<sup>2</sup> 下 3 种植模式(小麦单作、蚕豆单

作、小麦和蚕豆间作)的驯化土壤都种植单作小麦和单作蚕豆。本试验共计 12 个处理,重复 4 次。具体试验设计见图 1。

本试验选用的小麦和蚕豆品种分别为云麦 52 和玉溪大粒豆,同田间定位试验。试验所用盆钵大小为 290 mm×200 mm,装土 3 kg/盆;单作小麦留苗

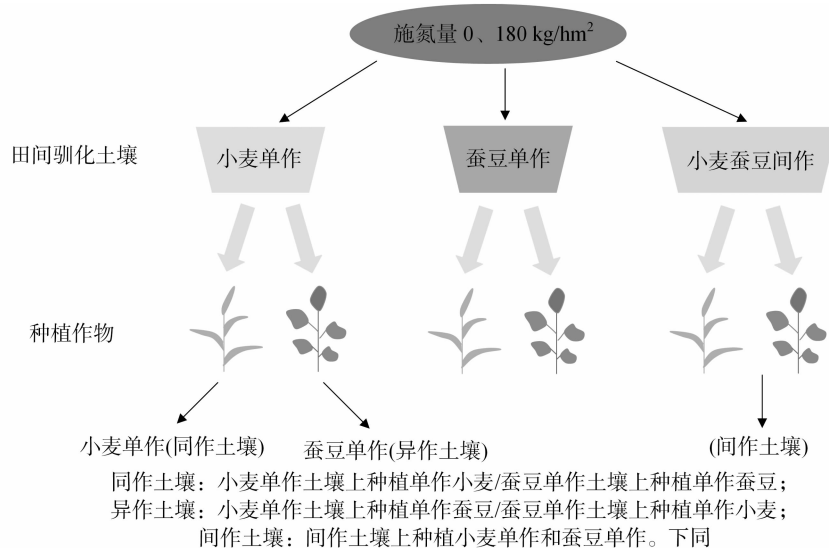


图1 试验设计示意图

6 株/盆,单作蚕豆留苗 3 株/盆。本试验通过换算设置盆栽 2 个氮水平: N0 为不施氮, N1 为小麦施氮量 150 mg/kg (以干土计,下同)、蚕豆施氮 75 mg/kg。小麦氮肥分基肥和追肥 2 次进行施用,施用比例为 1:1,其中追肥在小麦拔节期施用。蚕豆氮肥全部做基肥,一次性施入。

本试验钾肥 ( $K_2O$ ) 和磷肥 ( $P_2O_5$ ) 施用量都为 100 mg/kg,全部做基肥一次性使用。试验所用肥料为尿素 (含 N 46.0%)、普通过磷酸钙 (含  $P_2O_5$  16.0%)、硫酸钾 (含  $K_2O$  52.0%)。

盆栽随机摆放,每隔 3 d 浇 1 次水,每隔 5 d 测量小麦和蚕豆的株高和叶绿素含量。

### 1.3 样品采集与测定

在小麦和蚕豆的各生育期 (小麦苗期、分蘖期、拔节期、灌浆期、成熟期;对应蚕豆生育期为苗期、分枝期、开花期、结荚期、成熟期) 对每个处理的功能叶片 (避开叶脉) 使用 SPAD-502 Plus (Konica Minolta) 测定植株的叶绿素含量 (以 SPAD 值计),同时测量作物株高。

在小麦和蚕豆成熟后进行植株地上部和地下部的采收。先采集植株的地上部,再采集植株根部,用牛皮纸袋保存,之后对植株进行 105 °C 杀青 30 min,65 °C 烘干称重。

小麦和蚕豆根部使用抖土法,去除大量土壤,然后用流水洗去根系表面的土壤,采用 Epson P800 扫描仪对小麦、蚕豆根系进行扫描,之后用 WinRHIZO Manual 2013 HR 根系分析软件对扫描出的图片进行分析,测定小麦和蚕豆根系形态参数,包括

根长、根表面积、根直径、根体积、根分枝数、分叉数。

植物地上部和地下部氮含量的测定:用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮,半微量凯氏定氮法进行植株氮含量的测定<sup>[26-27]</sup>。

### 1.4 参数计算

氮吸收量 = 氮含量 × 植株干重。

小麦和蚕豆的植物-土壤反馈效应 (PSF) 和净反馈效应 (净 PSF) 采用 Bever 的方法<sup>[27]</sup> 进行判定:

$PSF = \ln(\text{作物在同作土壤上生长的植株干重}) - \ln(\text{作物在异作土壤或间作土壤上生长的植株干重})$ ;

净 PSF 效应 = 作物在同作土壤上生长的植株干重 - 作物在异作土壤或间作土壤上生长的植株干重。

其中:  $PSF > 0$ , 表明作物在同作土壤上比异作土壤或间作土壤上生长得更好。  $PSF < 0$ , 表明作物在异作土壤或间作土壤上比同作土壤上生长得更好;净  $PSF > 0$ , 正反馈;净  $PSF < 0$ , 负反馈。

### 1.5 数据分析

使用 Excel 2019 软件进行数据处理,使用 SPSS 20.0 软件对处理好的数据进行两因素方差分析,差异显著水平设置为  $\alpha = 0.05$ ,使用 Origin 2021 制图。图表中数据为“平均值 ± 标准差”。

## 2 结果与分析

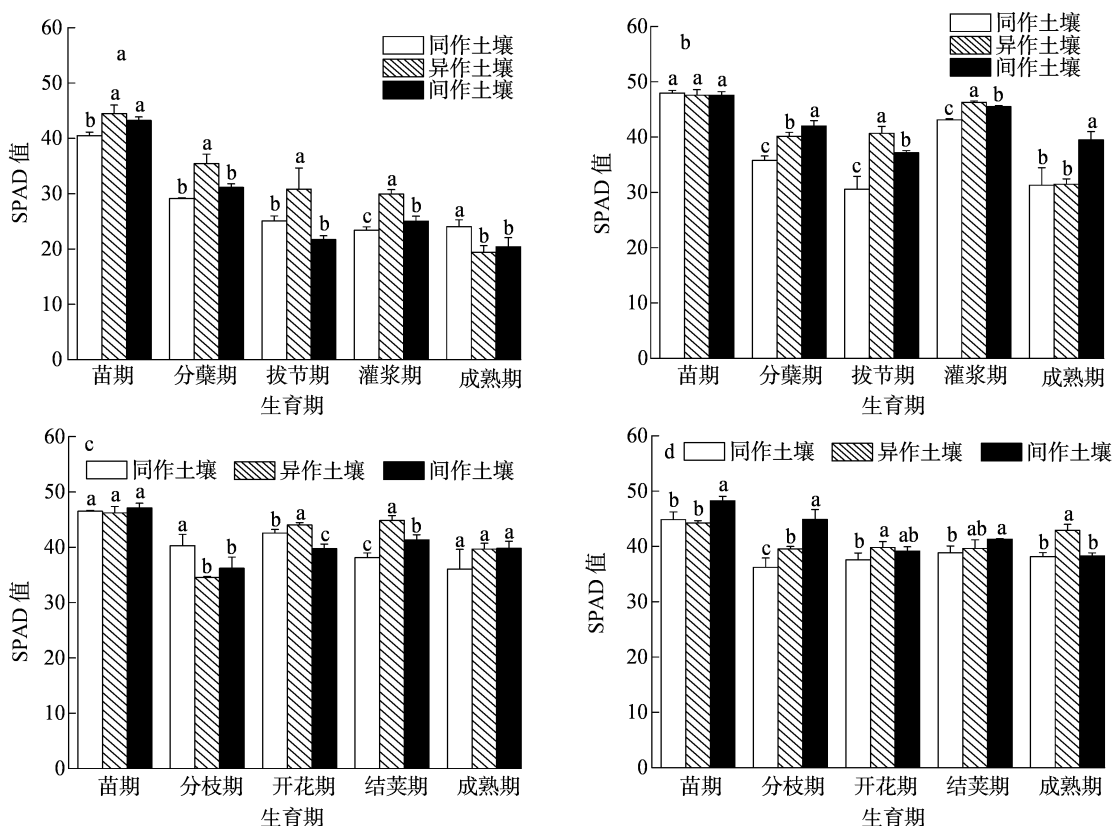
### 2.1 不同供试土壤对小麦和蚕豆植株叶片 SPAD 值和株高的影响

从图 2-a 和图 2-b 可以看出,与生长在同作土壤的小麦相比,异作土壤和间作土壤总体上有利于提高小麦叶片 SPAD 值。在 N0 水平下,与同作土

壤处理相比,异作土壤处理提高小麦叶片 SPAD 值 9.8% ~ 27.9% (除了小麦成熟期),间作土壤处理分别提高苗期和灌浆期小麦叶片 SPAD 值 6.7% 和 7.0%。在 N1 水平下,与同作土壤处理相比,在小麦分蘖期、拔节期、灌浆期,异作土壤处理分别提高小麦叶片 SPAD 值 12.2%、33.0%、7.3%;间作土壤处理下也提高小麦叶片 SPAD 值 5.6% ~ 26.2% (除小麦苗期外)。

但不同供试土壤对蚕豆叶片 SPAD 值的影响与小麦不同(图 2 - c、图 2 - d)。在 N0 水平下,与同作土壤处理相比较,异作土壤处理分别提高蚕豆开

花期和结荚期叶片 SPAD 值 3.4%、17.6%,但降低蚕豆分枝期叶片 SPAD 值 16.6%;在蚕豆苗期和成熟期,处理间未见显著差异。同样在 N0 水平下,与同作土壤处理相比较,间作土壤处理降低了分枝期和开花期蚕豆叶片 SPAD 值 11.2%、7.0%,但提高了结荚期蚕豆叶片 SPAD 值 8.4%;在蚕豆苗期和成熟期,未见两者有显著差异。在 N1 水平下,与同作土壤处理相比较,异作土壤处理分别提高分枝期、开花期和成熟期蚕豆叶片 SPAD 值 9.2%、5.9%、12.4%,间作土壤处理提高苗期、分枝期和结荚期蚕豆叶片 SPAD 值 7.6%、24.0% 和 6.4%。



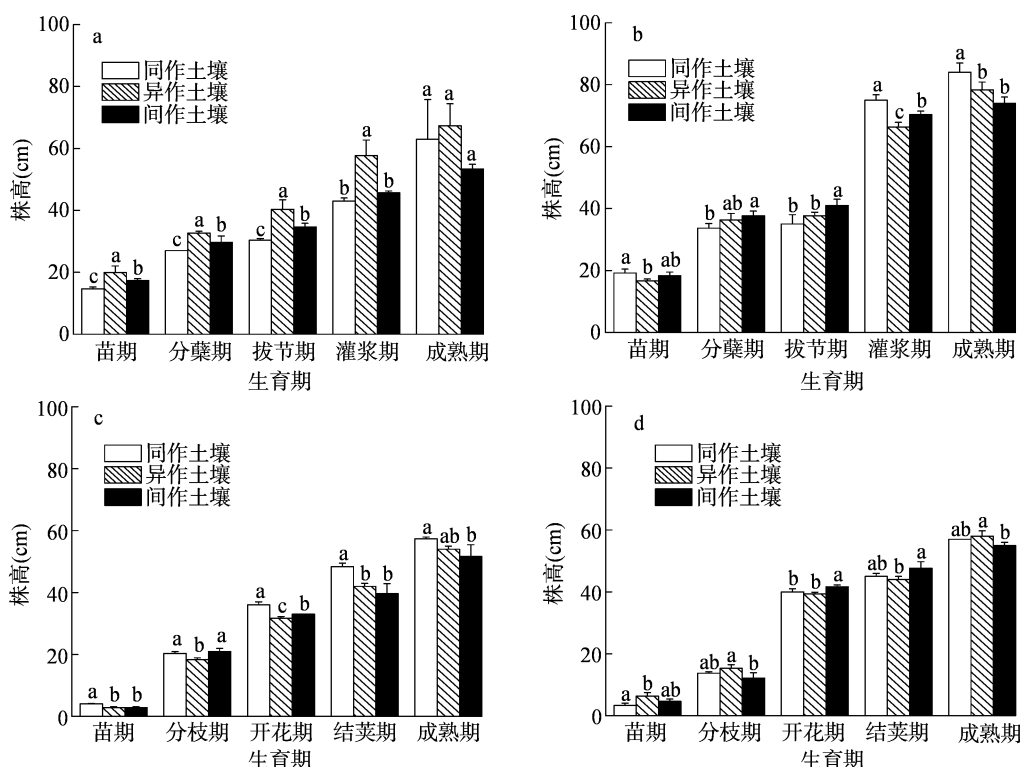
a、b 分别表示 N0、N1 水平下小麦植株的叶片 SPAD 值; c、d 分别表示 N0、N1 水平下蚕豆植株的叶片 SPAD 值; 柱上不同小写字母表示在同一生育期下小麦、蚕豆植株叶片 SPAD 值在不同供试土壤上差异显著 ( $P < 0.05$ )。下图同

图2 不同供试土壤下小麦和蚕豆植株叶片 SPAD 值

与同作土壤处理相比,N0 水平下(图 3 - a),异作土壤处理提高小麦株高 20.9% ~ 35.9% (除成熟期);同样,间作土壤处理分别提高苗期、分蘖期、拔节期小麦株高 18.2%、9.9%、14.3%,但是在小麦灌浆期和成熟未见显著差异。在 N1 水平下(图 3 - b),与同作土壤处理相比,异作土壤处理分别降低苗期、灌浆期和成熟期小麦株高 13.0%、11.6% 和 6.7%,间作土壤处理分别降低小麦灌浆期和成熟期株高 6.2%、11.9%。

在 N0 水平下(图 3 - c),与同作土壤处理相比,异作土壤处理降低蚕豆株高 9.8% ~ 30.3% (除蚕豆成熟期),同样间作土壤处理分别降低蚕豆株高 8.3% ~ 30.3% (除蚕豆分枝期)。在 N1 水平下(图 3 - d),与同作土壤处理相比,异作土壤处理仅提高了苗期蚕豆株高,其他生育期未见显著差异。同样,同作土壤处理相比,间作土壤处理仅提高了开花期蚕豆株高,其他生育期未见显著差异。

总的来说,在异作土壤和间作土壤上更有利于



a、b 分别表示 N0、N1 水平下小麦植株的株高；c、d 分别表示 N0、N1 水平下蚕豆植株的株高

图3 不同供试土壤下小麦和蚕豆植株株高

提高小麦株高和叶片叶绿素含量,且效果上异作土壤 > 间作土壤,但异作土壤和间作土壤对小麦株高和叶绿素含量的影响随氮肥施用而降低。反之,在异作土壤、间作土壤和同作土壤上,蚕豆株高和蚕豆叶片叶绿素含量几乎无差异。

## 2.2 不同供试土壤对小麦和蚕豆根系形态的影响

从表 2 可以看出,不同供试土壤、氮水平及氮水平 × 供试土壤类型主要影响了小麦根长、根表面积、根平均直径、根尖数、分支数和分叉数。在 N0 水平下,与同作土壤处理相比,异作土壤处理提高小麦根长(102.8%)、根表面积(1.1 倍)、根尖数(37.1%)、分支数(1.5 倍)、分叉数(52.0%);同样,间作土壤处理增加小麦根长(31.0%)、根表面积(41.9%)、根尖数(11.5%)、分支数(29.1%)、分叉数(16.1%)。在 N1 水平下,与同作土壤处理相比,异作土壤处理增加小麦根长(22.3%)、根尖数(14.8%)、分支数(75.1%)、分叉数(56.3%),但是根系变细了;同样,间作土壤处理小麦根系变细,但是增加了小麦根长(99.4%)、根表面积(22.3%)、根尖数(73.9%)、分支数(102.8%)、分叉数(1.7 倍)。不考虑氮水平,与同作土壤相比,异种和间作土壤主要是增加了小麦的

根长、根表面积、根尖数、分支数和分叉数,且促进效应表现为间作土壤 > 异作土壤。

从表 3 可以看出,本试验条件下蚕豆根系形态参数均受氮水平(除根系分支数)、供试土壤及氮类型水平 × 供试土壤类型的影响( $P < 0.01$ )。在 N0 水平下,与同作土壤处理相比,异作土壤处理的蚕豆根长、根表面积和根体积分别增加了 74.6%、69.0% 和 62.6%,但根系变细,根尖数和分叉数减少。反之,间作土壤处理根长、根尖数、分支数和分叉数分别增加了 36.0%、1.6 倍、1.3 倍、3.7 倍,但根系变细,表面积减小。在 N1 水平下,与同作土壤处理相比,异作土壤处理下蚕豆根长、根表面积、根体积和分支数分别提高了 33.0%、19.4%、31.7%、97.2%,但根系变细、根尖数、分叉数减少;间作土壤处理下蚕豆根系根长、根表面积、根平均直径、根平均值、根体积、根尖数、分支数、分叉数下降 5.4% ~ 310.4%,根系变短变细,分叉数和分支数减少。总之,异作土壤和间作土壤均促使蚕豆根系变长,且促进效应表现为异作土壤 > 间作土壤,但间作土壤显著增加了蚕豆根尖数和分叉数。氮肥施用抑制了异作土壤和间作土壤的促进效应。

表 2 不同供试土壤下小麦根系形态参数

项目 1	项目 2	根长 (cm)	根表面积 (cm <sup>2</sup> )	根平均直径 (mm)	根体积 (cm <sup>3</sup> )	根尖数 (个/盆)	分支数 (个/盆)	分叉数 (个/盆)
N0	同作土壤	371.61±8.88d	45.01±1.85d	0.33±0.01d	0.42±0.02d	2 715.00±19.08d	2 360.22±137.58d	184.00±2.00c
	异作土壤	753.73±23.22bc	93.20±13.31c	0.39±0.00c	0.80±0.05c	3 722.33±27.74b	2 396.33±76.22d	279.67±4.51b
	间作土壤	486.96±5.93d	63.88±1.41d	0.43±0.03b	0.63±0.02cd	3 026.00±42.58c	3 047.33±35.16c	213.67±6.51a
N1	同作土壤	709.63±44.02c	121.61±18.42b	0.47±0.01a	1.42±0.23a	2 717.00±90.84d	2 091.67±129.73e	106.00±19.73e
	异作土壤	867.83±10.11b	111.19±19.82bc	0.37±0.02cd	1.12±0.25b	3 119.56±165.86c	3 662.00±52.05b	165.67±4.51d
	间作土壤	1 415.06±157.19a	148.76±7.70a	0.36±0.00cd	1.56±0.17a	4 723.67±138.70a	4 243.00±193.75a	287.67±3.06a
	N0	537.43b	67.37b	0.38a	0.62b	3 154.44b	2 601.30b	225.78a
	N1	997.51a	127.19a	0.40a	1.37a	3 520.07a	3 332.22a	186.44b
	同作土壤	540.62c	83.31b	0.40a	0.93a	2 716.00c	2 225.94c	145.00c
	异作土壤	810.78b	102.20a	0.38a	0.96a	3 420.94b	3 029.17b	222.67b
	间作土壤	951.01a	106.32a	0.39a	1.09a	3 874.83a	3 645.17a	250.67a
差异显著分析结果	氮水平	***	***	ns	***	***	***	***
	供试土壤类型	***	*	ns	ns	***	***	***
	氮水平×供试土壤类型	***	***	***	**	***	***	***

注: 同列不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ); ns 表示差异不显著; \* 表示在 0.05 水平差异显著; \*\* 表示在 0.01 水平差异显著; \*\*\* 表示在 0.001 水平差异显著。表 3 同。

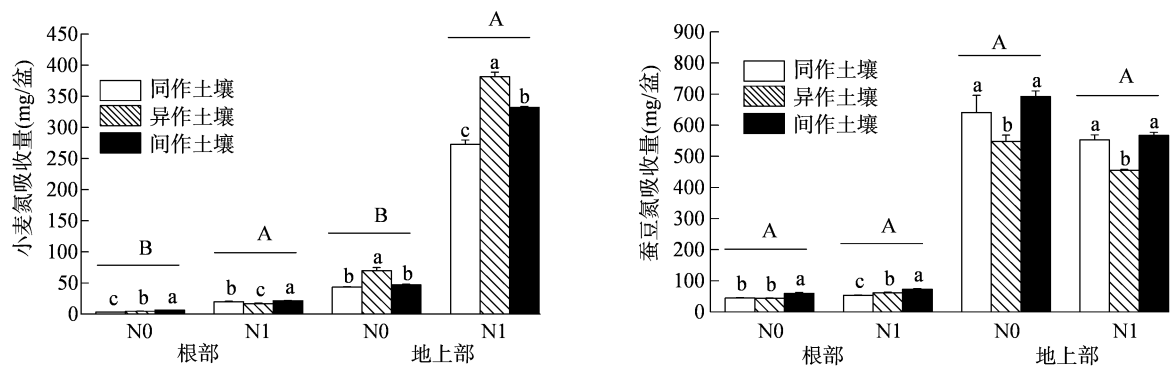
表 3 不同供试土壤下蚕豆根系形态参数

项目 1	项目 2	根长 (cm)	根表面积 (cm <sup>2</sup> )	根平均直径 (mm)	根体积 (cm <sup>3</sup> )	根尖数 (个/盆)	分支数 (个/盆)	分叉数 (个/盆)
N0	同作土壤	530.95±24.03c	112.69±3.11b	0.69±0.01a	2.03±0.01b	4 476.33±275.67b	1 174.33±107.98c	24.00±0.00d
	异作土壤	927.29±33.24a	190.44±6.13a	0.63±0.01c	3.30±0.15a	2 008.00±160.15d	1 299.33±164.31c	15.67±1.53e
	间作土壤	722.32±12.36b	90.57±8.24cd	0.51±0.00f	1.57±0.04d	11 481.00±273.46a	2 741.33±229.45a	113.67±8.74a
N1	同作土壤	435.94±55.31d	89.10±9.07d	0.65±0.00b	1.39±0.08e	4 530.00±44.53b	1 203.00±157.70c	79.33±2.08b
	异作土壤	579.87±28.75c	106.38±8.07bc	0.53±0.00e	1.83±0.07c	3 933.33±93.51c	2 372.67±106.40b	33.67±0.58c
	间作土壤	259.68±35.60e	84.23±14.87d	0.58±0.00d	0.94±0.12f	3 889.00±66.57c	1 048.30±89.53c	19.33±1.15de
	N0	726.86a	131.23a	0.61a	2.30a	5 988.44a	1 738.33a	51.11a
	N1	425.16b	93.24b	0.59b	1.38b	4 117.44b	1 541.33a	44.11b
	同作土壤	483.44b	100.90b	0.67a	1.71b	4 503.17b	1 188.67b	51.67b
	异作土壤	753.58a	148.41a	0.58b	2.57a	2 970.67c	1 836.00a	24.67c
	间作土壤	491.00b	87.40c	0.55c	1.25c	7 685.00a	1 894.83a	66.50a
差异显著分析结果	氮水平	***	**	***	***	***	ns	**
	供试土壤类型	***	***	***	***	***	***	***
	氮水平×供试土壤类型	***	***	***	***	***	***	***

2.3 不同供试土壤对小麦和蚕豆植株氮吸收量的影响

与同作土壤处理相比, N0 水平下异作土壤和间作土壤处理提高小麦根系氮吸收量 37.8% 和 94.8%; 在 N1 水平下, 间作土壤处理提高小麦根系氮吸收量 8.1%, 但异作土壤处理降低根系氮吸收量 15.8% (图 4)。从地上部来看, N0 水平下, 同作土壤和间作土壤处理间无显著差异, 但是异作土壤处理小麦地上部氮吸收量较同作土壤处理提高

61.1%。N1 水平下, 与同作土壤处理相比, 异作土壤和间作土壤处理分别提高小麦地上部氮吸收量 39.9% 和 21.7%。就蚕豆而言, 与同作土壤处理相比, 间作土壤处理蚕豆根系氮吸收量在 N0 和 N1 水平下分别提高 34.0% 和 36.4%, 但是对蚕豆地上部氮吸收量无影响; 与同作土壤处理相比, 异作土壤处理根系氮吸收量在 N1 水平下提高 15.4%, 但是其地上部氮吸收量在 N0 和 N1 水平下分别降低 14.5% 和 17.7%。



不同大写字母表示小麦蚕豆植株根部和地上部氮的吸收量在 N0 和 N1 水平下差异显著( $P<0.05$ ); 不同小写字母表示在同一氮水平下小麦蚕豆植株根部和地上部氮的吸收量在不同供试土壤上差异显著( $P<0.05$ )

图4 不同供试土壤下小麦和蚕豆根部与地上部氮吸收量

总体来看,异作土壤有利于提高小麦根系和地上部氮的吸收量,但异作土壤却抑制了蚕豆地上部氮累积量。与同作土壤相比,间作土壤有利于提高小麦和蚕豆地下部根系的氮累积量。综合小麦和蚕豆的氮素吸收来看,间作土壤促进效应大于异作土壤。

2.4 小麦和蚕豆的植物-土壤反馈效应

对小麦而言,N0 水平下,与同作土壤处理相比,异作土壤和间作土壤处理小麦植株干重分别提高 1.0 倍和 67.6%,但异作土壤和间作土壤处理间无差异(表 4);在 N1 水平下,异作土壤处理小麦植株干重提高 28.3%,间作土壤处理也有提高小麦植株

干重的趋势,但是差异不显著。异作土壤和间作土壤处理下反馈值和净反馈值均为负值,在 N1 水平下异作土壤处理 > 间作土壤处理。相反,与同作土壤处理相比,异作土壤处理和间作土壤处理对蚕豆植株干重无影响。从 PSF 和净 PSF 来看,异作土壤和间作土壤处理下反馈值和净反馈值都表现为负值,且在 N0 水平下异作土壤 < 间作土壤,而在 N1 水平下异作土壤处理 > 间作土壤处理。综合 2 种作物的生长和反馈效应来看,施氮均降低了异作和间作土壤的促进效应。在不施氮条件,间作土壤遗留正效应大于或等于异作土壤(轮作)。

表 4 小麦、蚕豆在不同供试土壤上的植株干重及植物-土壤反馈效应

作物	氮水平	土壤类型	植株干重 (g/盆)	PSF	净 PSF
小麦	N0	同作土壤	6.46 ± 0.95b *	—	—
		异作土壤	13.15 ± 1.61a *	-0.71a **	-6.69a *
		间作土壤	10.83 ± 1.53a *	-0.52a **	-4.37a
	N1	同作土壤	34.90 ± 2.29b *	—	—
		异作土壤	44.76 ± 2.46a *	-0.25a **	-9.86a *
		间作土壤	36.73 ± 3.85b *	-0.14b **	-5.35b
蚕豆	N0	同作土壤	24.99 ± 2.12a	—	—
		异作土壤	26.57 ± 2.90a	-0.06b *	-1.58b *
		间作土壤	27.18 ± 5.28a	-0.14a *	-3.93a
	N1	同作土壤	27.66 ± 7.41a	—	—
		异作土壤	31.56 ± 6.45a	-0.11a *	-3.54a *
		间作土壤	29.05 ± 8.93a	-0.06b *	-1.98b

注: \*、\*\* 表示同种作物、同一土壤类型下,生物量、PSF 和净 PSF 在 N0 和 N1 之间差异显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ );不同小写字母表示同种作物、同一氮水平下不同供试土壤间差异显著。

3 讨论

长期单作、轮作、间作会产生不同的土壤物理

性质、化学性质和微生物结构,对后茬作物生长的影响大不相同<sup>[10,28-29]</sup>。本研究发现,在异作和间作土壤上,小麦和蚕豆的反馈值和净反馈值都小于 0,

说明异作和间作土壤都更有利于小麦和蚕豆的生长。这一研究结果与 Wang 等在小麦 || 蚕豆、玉米 || 蚕豆间作系统的研究结果<sup>[29]</sup>一致。本研究结果进一步证实间作土壤养分遗留效应有利于后茬作物的生长,同时说明间作与轮作一样,可通过改善土壤非生物和生物环境<sup>[30]</sup>,抑制土壤自身带有的负反馈效应<sup>[25]</sup>,促进作物生长发育,提高系统生产力。本研究还发现,施氮均降低了间作和轮作的促生效应。不施氮条件下,间作和异作土壤的 PSF 和净 PSF 值无显著差异或者间作土壤大于异作土壤,说明不施氮条件下间作土壤促进后茬作物的生长效应等于甚至高于轮作;但是施氮条件下,异作土壤的促生效应大于间作土壤。因此,优化氮肥管理可以最大限度地发挥间作土壤对后茬作物的促生效应,对增强间作体系的正向遗留效应、持续提高系统生产力有着重要作用。

研究证实物种多样性对系统生产力存在正效应<sup>[31]</sup>,尤其豆科作物参与的轮作和间作模式可以提高氮素利用率,从而推动土壤遗留正效应的发生<sup>[32-33]</sup>。本试验条件下,与异作和同作土壤相比,即与小麦蚕豆轮作和连作相比,小麦蚕豆间作土壤均改变了小麦和蚕豆的根系形态参数,尤其是根长、根表面积,更有利于小麦和蚕豆地下部氮的吸收累积,更有利于促进豆科作物地上部氮的累积。而与间作相比,轮作土壤仅更有利于小麦地上部氮的吸收累积。这是因为在轮作体系中先种植豆科作物后其残留氮输入量可以明显地影响后茬作物对氮素的吸收<sup>[34]</sup>。本试验条件下,当蚕豆作为前茬作物时,土壤遗留效应提高了后茬小麦根系的根长、根表面积、根尖数、分支数和分叉数,促进了小麦地上部和根部氮素的吸收量,提高了小麦株高和 SPAD 值以及小麦植株干重。研究结果证实,豆科作物作为前茬作物能促进禾本科作物的根系生长和对氮素的吸收<sup>[34]</sup>。而小麦作为前茬作物时,土壤遗留效应也能改变后茬蚕豆的根系形态参数,促进蚕豆根系氮的吸收,但是土壤遗留效应的正向促进效应小于豆科作物作为前茬作物的效应<sup>[35]</sup>。因此,从作物氮素吸收量来看,本试验条件下土壤遗留的正向效应表现为间作 > 轮作 > 连作。

轮作和间作可以提高根际有益微生物如 AMF 和根瘤菌的数量和活性<sup>[36-38]</sup>。因此,轮作和间作带来土壤正向遗留效应能通过改变土壤微生物的群落结构,抑制土壤中病原菌的生长<sup>[39]</sup>,促进有益微

生物的数量和活性<sup>[40]</sup>。这些土壤有益微生物的改变也能通过参与植物对氮、磷等养分的吸收和利用而影响系统生产力<sup>[5]</sup>。本研究并未分析同作、异作、间作土壤微生物遗留效应的差异及其与作物生长、氮素养分吸收量及植株干重的关系。可以肯定土壤微生物遗留效应的差异必然存在,也必然驱动不同的系统生产力。后续还需从微生物遗留效应的视角开展深入的研究,进一步的解析间作持续提高系统生产力的机制。

#### 4 结论

在本试验条件下,异作土壤(轮作)和间作土壤促进了小麦干物质的累积,但对蚕豆干物质累积无影响。异作土壤(轮作)和间作土壤的 PSF 值和净 PSF 值都小于 0,说明轮作和间作均能促进小麦和蚕豆的生长,表现正向促生效应。异作土壤(轮作)和间作土壤改变了小麦和蚕豆的根系形态,提高了小麦、蚕豆根长和根表面积。但异作土壤更有利于促进小麦地上部氮素吸收量,间作土壤则更有利于小麦和蚕豆根系氮素吸收。施氮均抑制了轮作和间作的正向遗留效应。在不施氮的条件下,间作土壤的正向遗留效应大于等于轮作土壤;施氮条件下,则表现为轮作土壤 > 间作土壤。因此,进一步优化氮肥管理能扩大间作土壤的正向遗留效应,提高间作系统的生产力。

#### 参考文献:

- [1] 晏益民,肖路,刘艳杰. 前茬作物土壤遗留效应对野生大豆(*Glycine soja*)和栽培大豆(*Glycine max*)生长的影响[J]. 土壤与作物,2022,11(2):209-216.
- [2] del Fabbro C, Prati D. The relative importance of immediate allelopathy and allelopathic legacy in invasive plant species[J]. Basic and Applied Ecology,2015,16(1):28-35.
- [3] Nsikani M M, Novoa A, van Wilgen B W, et al. Acacia saligna's soil legacy effects persist up to 10 years after clearing: implications for ecological restoration[J]. Austral Ecology,2017,42(8):880-889.
- [4] Jing J Y, Cong W F, Bezemer T M. Legacies at work: plant - soil - microbiome interactions underpinning agricultural sustainability[J]. Trends in Plant Science,2022,27(8):781-792.
- [5] 王光州,贾吉玉,张俊岭. 植物 - 土壤反馈理论及其在自然和农田生态系统中的应用研究进展[J]. 生态学报,2021,41(23):9130-9143.
- [6] Revillini D, Gehring C A, Johnson N C. The role of locally adapted mycorrhizas and rhizobacteria in plant - soil feedback systems[J]. Functional Ecology,2016,30(7):1086-1098.
- [7] Bever J D, Westover K M, Antonovics J. Incorporating the soil



- community into plant population dynamics; the utility of the feedback approach[J]. *The Journal of Ecology*, 1997, 85(5): 561.
- [8] 周新刚, 马海鲲, 郭 辉, 等. 植物-土壤反馈理论及其在连作障碍管理中的应用[J]. *科技导报*, 2022, 40(3): 32-40.
- [9] Sawers R J H, Ramírez-Flores M R, Olalde-Portugal V, et al. The impact of domestication and crop improvement on arbuscular mycorrhizal symbiosis in cereals; insights from genetics and genomics[J]. *New Phytologist*, 2018, 220(4): 1135-1140.
- [10] Mariotte P, Mehrabi Z, Bezemer T M, et al. Plant-soil feedback: bridging natural and agricultural sciences[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2018, 33(2): 129-142.
- [11] Wei Z, Jousset A. Plant breeding goes microbial[J]. *Trends in Plant Science*, 2017, 22(7): 555-558.
- [12] Bennett A J, Bending G D, Chandler D, et al. Meeting the demand for crop production: the challenge of yield decline in crops grown in short rotations[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2012, 87(1): 52-71.
- [13] van der Putten W H, van Dijk C, Peters B A M. Plant-specific soil borne diseases contribute to succession in foredune vegetation[J]. *Nature*, 1993, 362: 53-56.
- [14] 杨绪清. 作物连作障碍研究进展[J]. *湖北植保*, 2023(4): 20-23, 29.
- [15] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(3): 173-181.
- [16] 赵思腾, 师尚礼, 陈建纲, 等. 陇中旱作区不同轮作方式对土壤碳、氮含量及酶活性的影响特征[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 817-824.
- [17] 郭金瑞, 宋振伟, 高洪军, 等. 玉米大豆长期轮作对土壤物理特性与水热特征的影响[J]. *大豆科学*, 2017, 36(2): 226-232.
- [18] Preiti G, Romeo M, Bacchi M, et al. Soil loss measure from Mediterranean arable cropping systems; effects of rotation and tillage system on C-factor[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170: 85-93.
- [19] Gan Y, Malhi S S, Brandt S, et al. Nitrogen use efficiency and nitrogen uptake of canola under diverse environments[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(2): 285.
- [20] 李小勇, 黄 威, 刘红菊, 等. 不同轮作模式下氮肥施用对油菜产量形成及养分利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(6): 1074-1085.
- [21] 高 盼, 刘玉涛, 王宇先, 等. 半干旱区玉米-大豆轮作对土壤物理性质和化学性质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2018(9): 23-26.
- [22] Copeland P J, Allmaras R R, Crookston R K, et al. Corn-soybean rotation effects on soil water depletion[J]. *Agronomy Journal*, 1993, 85(2): 203-210.
- [23] 耿赛男, 李岚涛, 苗玉红, 等. 大豆和玉米影响后茬作物氮素供应的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(5): 919-932.
- [24] 李天凯, 陈 林, 庞丹波, 等. 基于文献计量的植物-土壤反馈研究态势与热点分析[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(12): 73-86.
- [25] 赵榕江, 陈 焘, 董丽佳, 等. 植物-土壤反馈及其在生态学中的研究进展[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(10): 1333-1355.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] Bever J D. Soil community feedback and the coexistence of competitors: conceptual frameworks and empirical tests[J]. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 465-473.
- [28] Wang G Z, Bei S K, Li J P, et al. Soil microbial legacy drives crop diversity advantage: linking ecological plant-soil feedback with agricultural intercropping[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58(3): 496-506.
- [29] Jing J Y, Bezemer T M, van der Putten W H. Complementarity and selection effects in early and mid-successional plant communities are differentially affected by plant-soil feedback[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(3): 641-647.
- [30] 张 瑞, 焉学倩, 杨忠亮, 等. 作物间作研究进展[J]. *特产研究*, 2023, 61(10): 1-8.
- [31] 江小雷, 张卫国, 严 林, 等. 植物群落物种多样性对生态系统生产力的影响[J]. *草业学报*, 2004, 13(6): 8-13.
- [32] Li C J, Stomph T J, Makowski D, et al. The productive performance of intercropping[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(2): e2201886120.
- [33] Koyama A, Dias T, Antunes P M. Application of plant-soil feedbacks in the selection of crop rotation sequences[J]. *Ecological Applications*, 2022, 32(2): e2501.
- [34] Mayer J, Buegger F, Jensen E S, et al. Residual nitrogen contribution from grain legumes to succeeding wheat and rape and related microbial process[J]. *Plant and Soil*, 2003, 255(2): 541-554.
- [35] 胡怡凡, 刘佳坪, 王子楷, 等. 轮作提高土壤磷生物有效性改善后茬作物磷素营养[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1305-1310.
- [36] 李文娇, 杨殿林, 赵建宁, 等. 长期连作和轮作对农田土壤生物学特性的影响研究进展[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(3): 173-178.
- [37] 林伟伟, 李 娜, 陈丽珊, 等. 玉米与大豆种间互作对根际细菌群落结构及多样性的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(1): 26-37.
- [38] 黄 涛, 冯远娇, 王建武. 禾本科||豆科间作对土壤微生物影响的研究进展[J]. *生态科学*, 2022, 41(3): 229-236.
- [39] Cook R J. Take-all of wheat[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2003, 62(2): 73-86.
- [40] Bainard L D, Koch A M, Gordon A M, et al. Temporal and compositional differences of arbuscular mycorrhizal fungal communities in conventional monocropping and tree-based intercropping systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 172-180.