

实萆葱与小飞蓬秸秆混合腐解对两种伴生植物生长的协同与拮抗作用

杨柳青, 计怀峰, 林辰壹, 李文静, 梁健

(新疆农业大学园艺学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:以生长于新疆北部的实萆葱和入侵实萆葱种植地的小飞蓬作为供体植物,伴生植物蒜薹和马齿苋为受体材料,采用盆栽试验法研究不同分蘖株数实萆葱秸秆单一腐解以及不同分蘖株数实萆葱和小飞蓬秸秆室内混合腐解180 d后伴生植物的生长、生理变化及其对年生长结束后基质化学性质的影响。结果表明,单一腐解处理对蒜薹和马齿苋的根长、根体积和生物量积累分别表现出“低促高抑”和持续增强的抑制效果。混合腐解后,与单一腐解处理相比,同一低浓度下混合腐解处理对蒜薹的根长、根体积的促进作用分别消减了93%和61%,对地上部鲜、干质量的促进作用分别消减了30%、38%,对地下部鲜、干质量的促进作用分别消减了65%和90%,对马齿苋的根长和地下部鲜、干质量的抑制作用分别消减了60%、75%和49%,对根体积和地上部鲜、干质量则由抑制转变为促进作用。同一高浓度下混合腐解处理对蒜薹根体积的促进作用消减了77%,对地上部鲜、干质量和地下部鲜质量的抑制作用分别消减了37%、55%和31%,对马齿苋的根长、根体积、地上部干质量和地下部鲜质量的抑制作用分别消减了21%、51%、14%和33%。实萆葱与小飞蓬混合腐解后产生的复合他感作用总体表现为拮抗效应。相关性分析显示复合腐解基质的化学性质比实萆葱单一腐解基质更利于伴生植物的生长。研究结果显示实萆葱腐解产生的他感作用能够抑制伴生植物的生长和生理活动,而小飞蓬的入侵可以缓解伴生植物受到的这种抑制作用,并影响改变实萆葱种植地的EC值和pH值,进一步影响入侵地的物种多样性和生态稳定性。

关键词:实萆葱;小飞蓬;混合腐解;他感作用;伴生植物

中图分类号:S34;S45 **文献标志码:**A

Synergy and antagonism of decaying substance of *Allium galanthum* and *Conyza canadensis* on growth of two associated plants

YANG Liuqing, JI Huaifeng, LIN Chenyi, LI Wenjing, LIANG Jian

(College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: To examine the allelopathic effects of the invasive plant *Conyza canadensis* and *Allium galanthum* on growth and physiology of the associated plants and the chemical properties of the substrate after the end of growth, this study used the straw of *Allium galanthum* and *Conyza canadensis* which growing in northern Xinjiang as donor plants, *Thlaspi arvense* and *Portulaca oleracea* associated with *Allium galanthum* were chosen as recipient materials. The effects of single decomposition of *Allium galanthum* from different tillers and mixed decomposition of *Allium galanthum* from different tillers with *Conyza canadensis* for 180 days in doors on growth, physiological changes of associated plants and substrate chemical properties at the end of annual growth were studied by potted experiment method. The results showed that the effects of single decomposition treatment on various growth indicators of *Thlaspi arvense* and *Portulaca oleracea* were “promoted at low concentrations and inhibited at high concentrations” and continued enhancement, respectively. Compared with the single decomposition treatment, the inhibitory effects of mixed decaying substance on root length, root volume, aboveground fresh and dry mass, and underground fresh and dry mass of *Thlaspi arvense* were reduced by 93%, 61%, 30%, 38%, 65%, 90%, respectively, and the inhibitory effects of root length and underground biomass of *Portulaca oleracea* were reduced by 60%, 75%, 49%, respectively.

ly. The root volume and shoot biomass changed from inhibition to promotion at the same low concentrations. The promoting effect of mixed decaying substance on the root volume of *Thlaspi arvense* was reduced by 77%, and the inhibiting effects on the aboveground biomass and underground fresh mass were reduced by 37%, 55%, 31%, respectively. The inhibitory effects of root length, root volume, aboveground dry mass and underground fresh mass of *Portulaca oleracea* were reduced by 21%, 51%, 14%, 33% respectively at the same high concentration. The compound allelopathy of *Allium galanthum* and *Conyza canadensis* was antagonistic. Correlation analysis showed that the chemical properties of mixed decomposition matrix were more beneficial to the growth of associated plants than that of single decomposition matrix. The result showed that allelopathy induced by the decomposition of *Allium galanthum* inhibited the growth and physiological activities of the associated plants. The invasion of *Conyza canadensis* tended to alleviate the inhibition effect on the associated plants and change the EC and pH values and the species diversity and ecological stability of the farmland.

Keywords: *Allium galanthum*; *Conyza canadensis*; mixed decomposition; allelopathy; associated plants

自然生态系统中植物采用适当的途径向环境中释放特定的化感物质影响自身^[1]或改变生态系统的物理-化学结构及稳定性,改变微生物群落,破坏生物多样性^[2],通过他感作用的相互影响使自身在自然生态系统的资源竞争中获得优势^[3-4]。外来入侵植物在新的栖息环境中通常具有较强的他感作用而实现定居和扩散,对入侵地原生植物及生态环境造成严重影响^[5-6]。新疆是典型的大陆性干旱气候,生态系统结构相对简单脆弱,特殊的地理位置更易遭受外来植物的入侵,因此造成的负面影响更为显著^[7]。加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)和新疆农田生态系统中常见的外来入侵植物黄花刺茄(*Solanum rostratum*)均表现出对番茄(*Solanum lycopersicum*)种子萌发及幼苗生长的强烈抑制作用^[8-9]。小飞蓬(*Conyza canadensis*)是菊科白酒草属具有他感作用的外来入侵区域性恶性杂草,原产北美洲,在中国南北省(区)均有入侵^[10]。小飞蓬具有强大的繁殖和种子传播能力,表现出耐盐、抗旱、耐高温、抗除草剂能力及对多环芳烃(PAHs)的耐受性^[11-12],使其能入侵不同生态环境进行种群的定居和扩散,易形成单优势种群,并能通过分泌次生代谢物质来抑制邻近植物生长,同时还是多种农田害虫的中间寄主^[13-14]。小飞蓬的腐解物也表现出他感作用,对小白菜(*Brassica campestris*)和番茄的生物量积累及叶绿素合成均具有抑制作用^[15]。这些他感作用显示了入侵植物对农田生态系统的破坏能力。

实葶葱(*Allium galanthum*)是一种具有他感作用的野生葱属植物,前期研究发现实葶葱对芜菁(*Brassica rapa*)、鹰嘴豆(*Cicer arietinum*)、莴苣(*Lactuca sativa*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等多种植物生长表现出促进、抑制、或双重化感效应^[16-18],为人工驯化栽培制度的建立提供了有益途径。葱蒜类蔬菜

中的大蒜(*Allium sativum*)秸秆腐解后表现出提高豇豆(*Vigna unguiculata*)幼苗叶绿素含量、促进豇豆幼苗生长发育的有益作用^[19]。番茄与辣椒(*Capsicum annuum*)秸秆腐解后抑制了茄果类蔬菜的生长^[20],草莓(*Fragaria×ananassa*)的腐解物致使草莓发育不良、品质下降和土壤微环境失衡^[21],这些秸秆腐解的试验结果因作物不同表现出不同的作用类型。多年生的实葶葱在完成年生活史过程中产生脱落叶、花萼、果皮等残体,具有较大的生物量,具备他感作用的物质条件。然而实葶葱秸秆通过田间腐解后对其他植物产生何种作用类型还有待证实。1 a生的小飞蓬入侵实葶葱种植地完成年生活史之后会产生残体,在农田生长环境中与实葶葱的残体共存腐解。本试验基于这些特点,将荒漠农田生态系统下同域分布的实葶葱和小飞蓬共同作为他感研究的供体植物,选取农田生态环境下自然伴生的具有食药两用价值的十字花科蒜薹(*Thlaspi arvense*)、马齿苋科马齿苋(*Portulaca oleracea*)为受体植物,模拟实葶葱生长的农田生态环境以及小飞蓬入侵不同种植密度的实葶葱田块,将实葶葱与小飞蓬完成年生活史后的植物残体混合腐解,以期明确二者混合腐解物对伴生植物生长的作用方式和作用特点,掌握不同种植密度实葶葱和小飞蓬对伴生植物生长的他感作用关系,为了解实葶葱引种后对农田生态系统中伴生植物的生长发育、分布格局与演替规律的影响和实葶葱秸秆还田利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及试验地点

供体材料:实葶葱、小飞蓬;受体材料:蒜薹、马齿苋,供试基质为品氏托普草炭。试验材料均采集于新疆农业大学三坪实验实习基地实葶葱试验地

(43°56'58"N, 87°21'1"E), 该基地位于准噶尔盆地边缘, 据《新疆统计年鉴》记载^[22], 研究区域年平均气温为 7.4℃, 年均降水量为 334.5 mm, 蒸发量达 2 731.0 mm, 全年日照时数约 2 792.7 h, 春秋季节相对湿润, 夏季炎热而干旱, 冬季漫长而寒冷, 降水以积雪的形式保存, 属于典型的温带干旱气候。室内控制试验在新疆园艺作物种质资源与高效生产重点实验室进行。

1.2 研究方法

1.2.1 实葶葱与小飞蓬混合腐解基质制备 采集完成年生活史自然凋落干燥的全株实葶葱、小飞蓬残体。多年生实葶葱具有分蘖特性, 依据田间单位面积下 10 cm 深度的土壤范围中分别生长不同分蘖株的实葶葱产生的地上部残体质量与土壤质量比例设定 3 个试验浓度(表 1), 以草炭替代土壤, 处理 1(分蘖株数为 1) A1; 处理 2(分蘖株数为 2) A2; 处理 3(分蘖株数为 3) A3。每个处理再分别混入干质量比例为 0.56 : 100 (W/W) 的小飞蓬残体进行混合, 制成不同混合基质 A1C、A2C、A3C。基质充分混合后装入 45 cm×33 cm×16.5 cm 塑料钵中, 保持基质相对湿度为田间最大持水量的 50%^[19], 室温条件下腐解, 每隔 7 d 称重并补充水分。将腐解 180 d 的混合基质置于 14.5 cm×10 cm 营养钵中, 翌年 5 月温度稳定在 13℃以上时于田间播种。

秸秆腐解结束后、播种前和结束生长后分别测定基质 EC 值和 pH 值。

1.2.2 受体植物播种与管理 选取饱满、大小一致的受体种子用 1% 的次氯酸钠消毒 20 min, 清水冲洗 2~3 次。播种后每天对营养钵进行称重, 并进行水分补充, 当植株第一片真叶长出后每 7 d 测量 1 次株高, 至生长周期结束(约 98 d)后测定植株其他生长指标, 并采集植株叶片测定叶绿素含量, 采集植株根系测定根系活力。试验过程中不添加任何肥料^[23]。每个处理播种 15 粒, 重复 4 次。以不加实葶葱和小飞蓬植物残体的草炭为对照(CK), 分别播种菥蓂(CK-TA)、马齿苋(CK-PO), 实葶葱腐解的处理播种菥蓂(A-TA)和马齿苋(A-PO), 实葶葱和小飞蓬混合腐解的处理播种菥蓂(AC-TA)和马齿苋(AC-PO)。

1.2.3 指标测定与数据处理 使用 pH 计和电导率仪测定基质的 pH 值和 EC 值; 测量株高(Plant height)和根长(Root length), 地上、地下部干、鲜质量(Aboveground, underground dry, fresh mass)、排水法测量根体积(Root volume), 乙醇提取法测定叶绿素 a(Chlorophyll a)、叶绿素 b(Chlorophyll b)、类胡

萝卜素(Carotenoid)含量^[24], TTC 法测定根系活力(Root Activity)^[25]。参照 Williamson 和 Richardson^[26] 计算化感效应指数(Response index), $RI = T/C - 1$ ($T < C$); $RI = 1 - C/T$ ($T \geq C$), 其中 C 为对照值, T 为处理值。

采用 Excel 2019、SPSS 19.0 进行数据统计、方差分析和相关性分析($P < 0.05$), 用 Origin 9.0、Graph Pad Prism 8.0 作图。数据用平均值±标准误表示。

表 1 混合腐解基质浓度设定

处理 Treatment	浓度比 Concentration ratio (W/W)
CK	草炭=100 Turf = 100
A1	实葶葱 : 草炭 = 0.81 : 100 Allium galanthum : Turf = 0.81 : 100
A2	实葶葱 : 草炭 = 1.62 : 100 Allium galanthum : Turf = 1.62 : 100
A3	实葶葱 : 草炭 = 2.43 : 100 Allium galanthum : Turf = 1.62 : 100
A1C	实葶葱 : 草炭 : 小飞蓬 = 0.81 : 100 : 0.56 Allium galanthum : Turf : Conyza canadensis = 0.81 : 100 : 0.56
A2C	实葶葱 : 草炭 : 小飞蓬 = 1.62 : 100 : 0.56 Allium galanthum : Turf : Conyza canadensis = 1.62 : 100 : 0.56
A3C	实葶葱 : 草炭 : 小飞蓬 = 2.43 : 100 : 0.56 Allium galanthum : Turf : Conyza canadensis = 2.43 : 100 : 0.56

2 结果与分析

2.1 不同浓度实葶葱和小飞蓬混合腐解对两种伴生植物生长的影响

他感作用由表 2 和图 1a 可知, A1-TA 处理显著促进菥蓂植株的根长、根体积、地上和地下部鲜、干质量, 与对照(CK-TA)相比分别增长了 130%、433%、151%、153%、700% 和 840%, A1C-TA 处理对菥蓂的根长、根体积、地上部鲜、干质量、地下部鲜、干质量的促进作用相较 A1-TA 处理分别消减了 93%、61%、30%、38%、65%、90%。A2-TA 处理下的根长、根体积、地下部鲜质量和对照比呈现促进作用, 但其促进效果弱于 A1-TA 处理, 地上部鲜、干质量和地下部干质量与对照相比呈现抑制作用, 但差异不显著。A2C-TA 处理对菥蓂的根长、地上部鲜、干质量和地下部干质量的影响与实葶葱腐解产生拮抗效应, 对根体积和地下部鲜质量的影响则产生协同作用。当混合基质中实葶葱浓度增加到 A3 时, 菥蓂的根长、地上和地下部鲜、干质量均受到抑制, 与对照相比, 分别降低了 19%、68%、66%、13% 和 17%, 而根体积则显著增加了 75%, A3C-TA 处理对菥蓂根体积的促进作用相较 A3-TA 处理消减了 77%, 对地上部鲜、干质量和地下部鲜质量的抑制作用消减了 37%、55% 和 31%, 具有显著化感拮抗作用, 与根长和地下部干质量则具有协同抑制作用。

结果显示,腐解基质中实葶葱浓度的增加显著影响了菥蓂植株的各项生长指标,呈“低促高抑”效应,低浓度实葶葱腐解对菥蓂植株的生长产生促进作用,高浓度实葶葱腐解对菥蓂植株的生长产生抑制作用,并与小飞蓬的他感作用整体上产生拮抗效应。

混合腐解基质中实葶葱浓度的增加显著影响了马齿苋植株的各项生长指标,由表2和图1b可知,A1-PO处理下的各项指标均表现为抑制作用,与对照(CK-PO)相比分别降低了5%、11%、12%、5%、55%和35%。其中,地下部鲜质量受抑制作用的影响最大。混合基质A1C-PO处理对马齿苋的根长和地下部鲜、干质量的抑制作用相较A1-PO处

理消减了60%、75%和49%,对根体积和地上部干质量则由抑制转变为促进作用。A2-PO处理的根长、地上部鲜质量和地下部鲜、干质量和对照比呈现抑制作用,其抑制效果强于A1-PO处理,根体积和地上部干质量与对照相比差异不显著。混合基质A2C-PO处理中对马齿苋地下部干质量的抑制作用相较A2-PO处理消减了58%,根长、地上部鲜、干质量和地下部鲜质量均由抑制转变为促进作用。当混合基质中实葶葱浓度增加到A3时,马齿苋的各项指标受到的抑制作用最强,与对照相比,分别降低了42%、67%、63%、70%、78%和67%。混合基质A3C-PO处理对马齿苋的根长、根体积、地上部干质

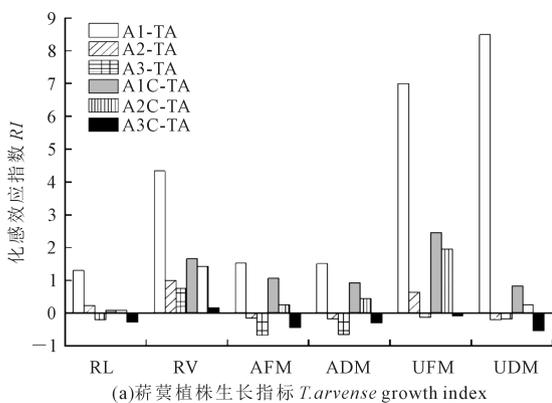
表2 不同浓度混合腐解基质对两种伴生植物生长的影响

Table 2 Effects of different concentrations of mixed decomposition matrix on the growth of the two associated plants

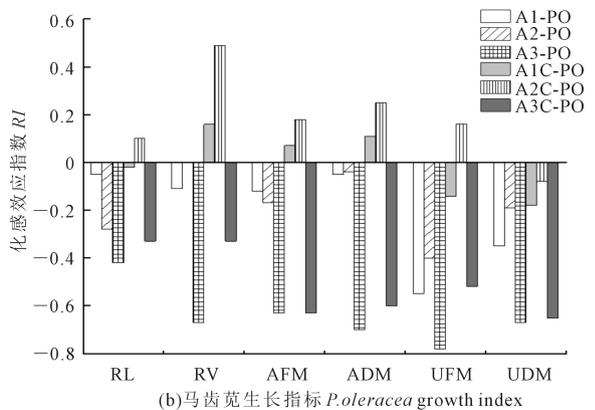
处理 Treatment	根长 Root length/mm	根系体积 Root volume/cm ³	地上部质量 Aboveground mass/g		地下部质量 Underground mass/g	
			鲜质量 Fresh mass	干质量 Dry mass	鲜质量 Fresh mass	干质量 Dry mass
CK-TA	105.93±2.93c	0.80±0.06d	1.99±0.08c	0.35±0.01d	0.24±0.02e	0.05±0.01ab
A1-TA	243.86±8.82a	4.27±0.09a	4.27±0.26a	4.97±0.02a	1.88±0.01a	0.47±0.07a
A2-TA	130.93±6.03b	1.60±0.06c	1.92±0.05c	0.32±0.04d	0.44±0.02d	0.04±0.03ab
A3-TA	85.93±4.75d	1.47±0.03c	0.68±0.01e	0.12±0.04e	0.24±0.01e	0.04±0.01ab
A1C-TA	115.84±5.88bc	2.07±0.15b	4.63±0.14a	0.67±0.01b	0.93±0.01b	0.09±0.01ab
A2C-TA	114.87±6.44bc	2.00±0.06b	2.65±0.06b	0.50±0.01c	0.79±0.01c	0.06±0.01ab
A3C-TA	77.54±7.80d	0.93±0.09d	1.20±0.02d	0.24±0.01de	0.25±0.01e	0.02±0.01b
CK-PO	169.50±0.41ab	0.87±0.03c	12.45±0.04b	1.15±0.02c	1.75±0.02b	0.13±0.01a
A1-PO	150.78±0.24b	0.80±0.02c	11.90±0.45b	1.13±0.02c	0.78±0.02e	0.09±0.01c
A2-PO	114.98±0.61c	0.87±0.03c	10.38±0.22c	1.14±0.04c	1.06±0.02d	0.11±0.01b
A3-PO	82.12±0.82d	0.33±0.03e	4.60±0.16d	0.43±0.04d	0.38±0.01f	0.04±0.01d
A1C-PO	164.24±1.13ab	1.00±0.01b	11.66±0.46b	1.32±0.03b	1.50±0.08c	0.11±0.01b
A2C-PO	174.70±0.53a	1.30±0.01a	14.65±0.18a	1.48±0.01a	2.03±0.01a	0.13±0.01a
A3C-PO	107.42±0.34c	0.57±0.03d	4.61±0.11d	0.47±0.01d	0.84±0.08e	0.05±0.01d

注:同列不同小写字母分别表示同种伴生植物不同处理间差异显著($P<0.05$)。A1:腐解基质中含有1株实葶葱分蘖株;A2:腐解基质中含有2株实葶葱分蘖株;A3:腐解基质中含有3株实葶葱分蘖株;C:腐解基质中含有小飞蓬;TA:菥蓂;PO:马齿苋。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate the significant differences between treatments of the same associated plant species ($P<0.05$). A1: One tiller of *Allium galanthum* stalk was found in the decomposed substrate; A2: Two tillers of *Allium galanthum* stalk was found in the decomposed substrate; A3: Three tillers of *Allium galanthum* stalk was found in the decomposed substrate; C: The decolorized peat contains *Conyza canadensis*; TA: *Thlaspi arvense*; PO: *Portulaca oleracea*. The same below.



(a)菥蓂植株生长指标 *T. arvense* growth index



(b)马齿苋生长指标 *P. oleracea* growth index

注:RL:根长;RV:根体积;AFM:地上部鲜质量;ADM:地上部干质量;UFM:地下部鲜质量;UDM:地下部干质量。下同。

Note: RL: Root length; RV: Root volume; AFM: Aboveground fresh mass; ADM: Aboveground dry mass; UFM: Underground fresh mass; UDM: Underground dry mass. The same below.

图1 不同浓度混合腐解基质对两种伴生植物生长指标的化感效应指数

Fig.1 Response index of different concentrations of mixed decomposition matrix on growth index of two associated plants

量和地下部鲜质量的抑制作用相较 A3-PO 处理分别消减了 21%、51%、14% 和 33%。结果显示,实萆葱腐解的他感作用对马齿苋植株的生长产生抑制作用,且随着基质中实萆葱浓度升高,抑制作用亦增强,小飞蓬参与混合腐解后表现出的他感作用则与其产生拮抗作用,缓解了马齿苋生长受到的抑制。

蒜薹生长阶段株高测定结果(图 2a,见 102 页)显示,混合腐解基质中实萆葱浓度的增加和小飞蓬的添加影响了蒜薹的株高,蒜薹在整个生长期的生长速率都较为缓慢,所有处理的蒜薹植株都较为矮小。在出苗后 7~28 d 时,各处理的生长速率 CK>A1>A1C>A3C>A2C>A2>A3;出苗后 35~63 d 时,各处理的生长速率 A1>A1C>A2C>A2>A3C>CK>A3;出苗后 70~98 d 时,各处理的生长速率 A1>A1C>A2C>A3C>A2>CK>A3。在株高方面,A1、A1C、A2C、A3C 均受到促进作用,和 CK-TA 相比分别增加了 34%、23%、12%、5%,其中 A1 受到促进作用最强。A2、A3 均受到抑制作用,和 CK-TA 相比分别降低了 3%和 33%,其中 A3 受到抑制作用最强。

马齿苋生长阶段株高测定结果(图 2b,见 102 页)显示,混合腐解基质中实萆葱浓度的增加和小飞蓬的添加影响了马齿苋的株高,马齿苋在整个测定阶段株高在不断增长。在出苗后 7~28 d,各处理的生长速率 A1C>CK>A2C>A1>A3C>A2>A3;出苗后 35~63 d 时,生长速率 A2C>A1C>CK>A1>A2>A3C>A3;出苗后 70~98 d 时,生长速率 A1C>A2C>CK>A1>A2>A3C>A3。在株高方面,A1C、A2C 均受

到促进作用,和 CK-PO 相比分别增加了 29%、23%,其中 A1C 受促进作用最强。A3C、A1、A2、A3 均受到抑制作用,和 CK-PO 相比,分别降低了 35%、6%、9%和 51%,其中 A3 受到抑制作用最强。

结果显示,在混合腐解基质中小飞蓬和实萆葱对蒜薹、马齿苋株高的他感作用产生拮抗的效果。

2.2 不同浓度实萆葱和小飞蓬混合腐解对两种伴生植物叶绿素含量和根系活力的影响

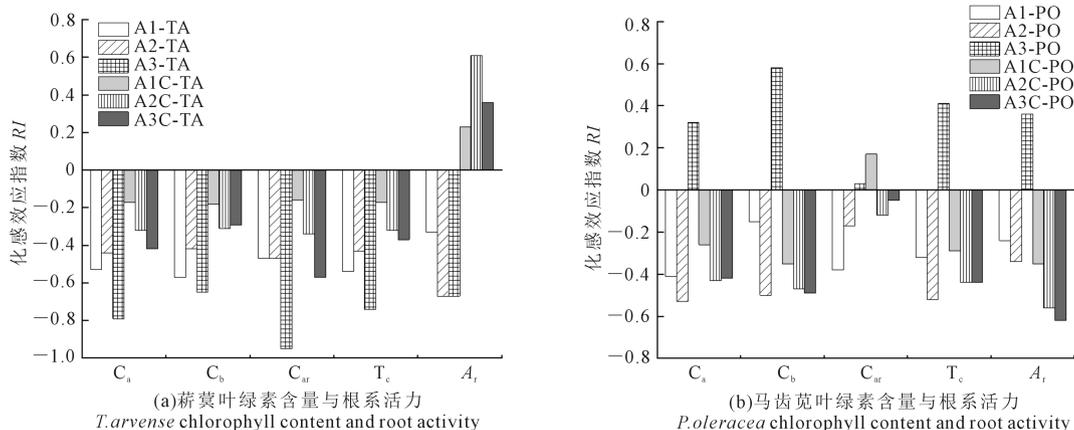
由表 3 和图 3a 可知,A1-TA 处理显著抑制了蒜薹的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、总叶绿素含量和根系活力,与对照(CK-TA)相比分别降低了 53%、57%、47%、54%和 33%,其中,叶绿素 b 受抑制作用的影响最大;混合基质 A1C-TA 处理中对蒜薹叶绿素各项指标的抑制作用相较 A1-TA 处理消减了 68%、68%、66%和 69%,根系活力由抑制转为促进作用。A2-TA 处理下的各项指标与对照相比呈现抑制作用,其中对其根系活力的抑制效果强于 A1-TA,降低了 67%,混合基质 A2C-TA 处理中对蒜薹叶绿素各项指标的抑制作用相较 A2-TA 处理消减了 27%、36%、28%和 26%,根系活力由抑制转为促进作用。A3 浓度时,蒜薹的各项指标受抑制程度最大,与对照相比,分别降低了 79%、65%、95%、74%和 67%,其中类胡萝卜素受浓度影响最大;混合基质 A3C-TA 处理中对蒜薹叶绿素各项指标的抑制作用相较 A3-TA 处理消减了 47%、55%、40%和 50%,根系活力由抑制转为促进作用。

由表 3 和图 3b 可知,A1-PO 处理下的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、总叶绿素含量和根系活力

表 3 不同浓度混合腐解基质对两种伴生植物叶绿素含量和根系活力的影响

Table 3 Effects of different concentrations of mixed decomposition matrix on chlorophyll content and root activity of two associated plants

处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content /(mg · g ⁻¹)	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content /(mg · g ⁻¹)	类胡萝卜素含量 Carotenoid content /(mg · g ⁻¹)	总叶绿素含量 Total chlorophyll content /(mg · g ⁻¹)	根系活力 Root activity /(μg · g ⁻¹ · h ⁻¹)
CK-TA	5.38±0.01a	2.66±0.01a	0.80±0.01a	8.04±0.03a	0.30±0.08bc
A1-TA	2.54±0.04d	1.37±0.12e	0.42±0.01d	3.68±0.03e	0.20±0.01d
A2-TA	3.07±0.06d	1.65±0.05d	0.42±0.01d	4.35±0.11d	0.10±0.03e
A3-TA	1.26±0.06e	0.93±0.01f	0.04±0.01f	2.09±0.01f	0.10±0.05e
A1C-TA	4.48±0.06b	2.19±0.03b	0.64±0.04b	6.67±0.04b	0.37±0.07b
A2C-TA	3.58±0.07c	1.84±0.03c	0.57±0.04c	5.22±0.09c	0.48±0.30a
A3C-TA	3.11±0.02c	1.89±0.03c	0.34±0.02e	5.07±0.04c	0.41±0.03a
CT-PO	2.10±0.01b	1.07±0.02b	0.29±0.01b	3.17±0.03b	0.27±0.02b
A1-PO	1.24±0.3d	0.91±0.05c	0.18±0.01d	2.15±0.06c	0.20±0.01c
A2-PO	0.98±0.03f	0.54±0.02f	0.24±0.01c	1.52±0.04f	0.19±0.01c
A3-PO	2.77±0.01a	1.69±0.01a	0.30±0.01b	4.46±0.02a	0.38±0.01a
A1C-PO	1.56±0.06c	0.70±0.05d	0.35±0.02a	2.24±0.03c	0.18±0.01c
A2C-PO	1.20±0.03d	0.56±0.01f	0.26±0.01c	1.76±0.03d	0.13±0.01d
A3C-PO	1.22±0.02d	0.54±0.03f	0.28±0.01bc	1.76±0.05d	0.11±0.01d



注: C_a :叶绿素 a; C_b :叶绿素 b; C_{ar} :类胡萝卜素; T_c :总叶绿素; A_r :根系活力。下同。

Note: C_a : Chlorophyll a; C_b : Chlorophyll b; C_{ar} : Carotenoid; T_c : Total chlorophyll; A_r : Root activity. The same below.

图3 不同浓度混合腐解基质对两种伴生植物叶绿素含量与根系活力的化感效应指数

Fig.3 Response index of different concentrations of mixed decomposition matrix on chlorophyll content and root activity of two associated plants

均表现为显著抑制作用,与对照(CK-PO)相比分别降低了41%、15%、38%、32%和24%。其中,叶绿素a受抑制作用的影响最大。混合基质A1C-PO处理中对马齿苋叶绿素a含量的抑制作用相较A1-PO处理消减了37%,类胡萝卜素含量由抑制转为促进作用,对叶绿素b和根系活力的他感效应呈协同作用。A2-PO处理下的各项指标与对照相比呈现抑制作用,分别和对照相比降低了53%、50%、17%、52%、34%,其中对其叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量的抑制效果强于A1-PO处理,混合基质A2C-PO处理中对马齿苋叶绿素a和类胡萝卜素含量的抑制作用相较A2-PO处理分别消减了19%和29%,对根系活力的他感效应呈协同作用。A3浓度时,马齿苋的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量和根系活力与对照相比,分别显著增加了32%、169%、41%和36%,其中叶绿素b受浓度影响最大。混合基质A3C-PO处理中对马齿苋叶绿素和根系活力各项指标相较A3-PO处理由促进转为抑制作用。

以上结果显示,混合腐解基质中实葶葱与小飞蓬腐解对葶葱与马齿苋的叶绿素含量和根系活力的他感作用主要产生拮抗效应。

2.3 混合腐解后基质EC值与pH值的变化

由表4可知,腐解结束时,混合腐解基质中实葶葱浓度的增加显著影响了基质的化学性质,并与小飞蓬腐解对混合基质化学性质的影响呈拮抗作用,在EC值和pH值方面存在显著差异。随着实葶葱浓度的增加,A1~A3的EC值与对照(CK)相比分别增加了78%、90%、117%;pH值与对照相比分别降低了18%、23%、18%。腐解基质中随着小飞蓬的

加入,EC值降低,A1C~A3C分别比A1~A3降低了7%、28%、17%;pH值增加,A1C~A3C分别比A1~A3增加了1%、11%、1%。

在葶葱结束生活史后,腐解基质A1、A2的EC值和对照相比分别显著增加了31%、17%;添加小飞蓬的A1C~A3C处理EC值分别比A1~A3增加了8%、16%、29%。A1、A2处理下的基质pH值和对照相比显著降低了2%、2%。添加小飞蓬的A1C~A3C处理pH值分别比A1~A3处理降低了2%、2%和3%。

在马齿苋结束生活史后,A1~A3的基质EC值和对照相比分别显著增加了46%、74%、85%,添加小飞蓬的A1C~A3C处理的EC值分别比A1~A3降低了9%、35%、76%。A1、A2处理的基质pH值和对照相比分别显著增加了3%和降低了2%,添加小飞蓬的A1C处理的pH值与A1相比显著降低了6%。

2.4 混合腐解基质的EC值和pH值与两种伴生植物生长指标的相关性分析

由图4可知,混合腐解基质的EC值和pH值与各伴生植物生长指标显著相关。葶葱结束生长周期后基质的EC值与其株高、地上部干质量极显著正相关,与根体积、地下部鲜质量和根系活力显著正相关;pH值与株高、地下部鲜、干质量和根系活力显著负相关,与地上部鲜质量显著负相关。马齿苋结束生长周期后基质的EC值与其根长、地下部鲜质量极显著负相关,与株高、地上部鲜、干质量和地下部干质量显著负相关;pH值与类胡萝卜素含量极显著负相关,与根体积显著正相关。

表 4 栽培两种伴生植物后混合腐解基质 EC 值与 pH 值的变化

Table 4 Change in EC and pH value of mixed decomposition matrix for cultivating two associated plants

处理 Treatment	EC/(mS · cm ⁻¹)			pH		
	初始值 Initial value	茛菪 <i>T. arvense</i>	马齿苋 <i>P. oleracea</i>	初始值 Initial value	茛菪 <i>T. arvense</i>	马齿苋 <i>P. oleracea</i>
CK	0.15±0.00e	0.36±0.00d	0.29±0.01d	7.41±0.06a	6.28±0.02a	6.00±0.00b
A1	0.27±0.01b	0.47±0.01b	0.43±0.00b	6.02±0.03cd	6.13±0.03bc	6.17±0.03a
A2	0.28±0.01b	0.42±0.01c	0.51±0.03a	5.69±0.05e	6.17±0.03b	5.90±0.03c
A3	0.33±0.00a	0.34±0.02d	0.54±0.04a	6.07±0.03cd	6.32±0.03a	5.95±0.04bc
A1C	0.25±0.01c	0.51±0.00a	0.37±0.00bc	6.08±0.02cd	6.00±0.00d	5.80±0.01d
A2C	0.20±0.00d	0.49±0.00ab	0.33±0.00cd	6.29±0.01b	6.08±0.015c	5.96±0.03bc
A3C	0.28±0.00b	0.43±0.00c	0.41±0.01b	6.14±0.02c	6.10±0.003c	5.90±0.01b

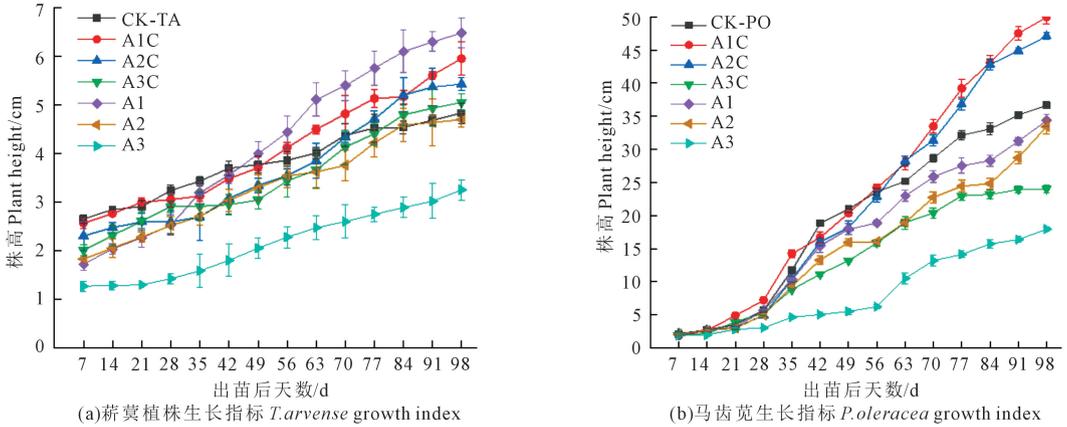
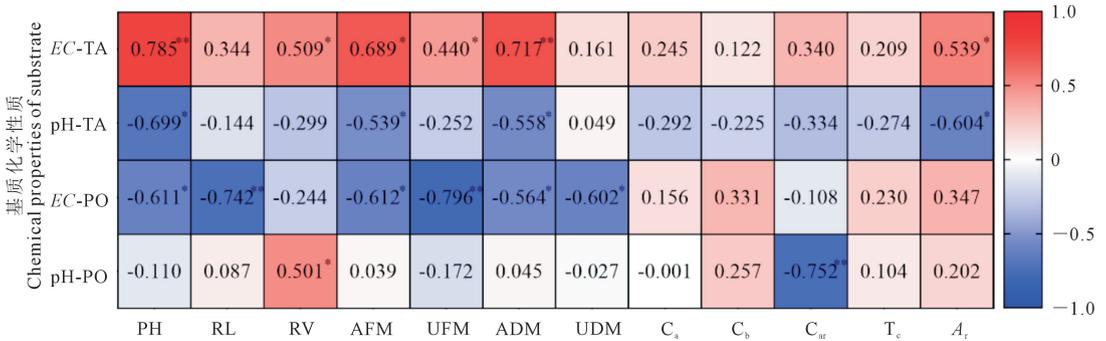


图 2 不同浓度混合腐解基质对两种伴生植物生长趋势的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of mixed decomposition matrix on growth trends of two associated plants



注:PH:株高。 Note: Plant height.

图 4 混合腐解基质的化学性质与两种伴生植物生长指标的相关性分析 (n = 21)

Fig. 4 Correlation analysis between chemical properties of mixed decomposition matrix and growth indices of two associated plants

3 讨论

本试验模拟小飞蓬入侵实蕁葱种植地后和实蕁葱秸秆共同腐解,以原农田环境下分布的、存在竞争关系并具有食、药用价值的茛菪和马齿苋作为受体材料^[27-28],研究其化感作用,结果显示:随着腐解基质中实蕁葱浓度的增加,对茛菪的生长和生物量积累表现为“由促进转向抑制的双重效应”,同时对茛菪的叶绿素合成和根系活力也具有抑制作用;对马齿苋的生长和生物量累积表现为抑制并随浓

度增加抑制效果增强的趋势,而对马齿苋的叶绿素、类胡萝卜素合成以及根系活力表现为“由抑制转向促进的双重效应”。这与胡桃 (*Juglans regia*) 凋落叶对小麦 (*Triticum aestivum*) 株高及生物量积累存在抑制作用^[29],小飞蓬秸秆腐解物对牛膝菊 (*Galinsoga parviflora*) 的叶绿素合成存在促进作用的研究结果相似^[30]。根系是植物重要的养分吸收器官,是最早感受环境信号并产生生理响应从而对植株地上部生长发育产生影响的组织,他感效应通常可以通过影响植物根系生长来体现^[31],受体植物

菥蓂和马齿苋根系都受到了他感作用影响,表现出不同的他感作用类型。在以往的研究中实葶葱叶片浸提液对苜蓿的种子萌发存在抑制作用,而对莴苣幼苗生长产生促进作用^[17-18],本研究结果也显示了供体植物他感作用的类型与受体植物种类密切相关,并且作用于受体植物不同的生长阶段,影响植物生长^[32]。

化感物质之间存在协同、加合和拮抗关系而表现出不同的作用结果^[33],如小飞蓬与加拿大一枝黄花产生的复合他感作用表现出协同抑制作用,进一步抑制大豆幼苗的生长^[15]。试验结果显示:当小飞蓬参与腐解后,实葶葱和小飞蓬混合腐解产生的复合他感作用对菥蓂和马齿苋植株生长和叶绿素合成的抑制作用相比实葶葱单一腐解物的他感作用显著降低,对菥蓂根系活力的影响从抑制转为促进作用,实葶葱与小飞蓬的化感物质共存的复合作用产生了拮抗效应,而马齿苋根系活力受到实葶葱他感作用的抑制效果则因小飞蓬混合腐解时的加入而加强,实葶葱与小飞蓬对马齿苋根系活力的抑制效果表现为协同增强效应,这一结果再次表明了他感作用类型与发生机理因受体植物的不同而改变^[32]。综合以上结果可以认为,小飞蓬在入侵实葶葱种植地的过程中释放化感物质与实葶葱释放的化感物质主要产生拮抗作用,能够消减实葶葱对伴生植物的抑制,为小飞蓬的种群扩散创造有利条件,与前人研究结果相似^[15],具体表现在对受体植株光合能力的强弱、根系生长和生长环境的化学性质上。本试验结果也验证了化感协同、拮抗效应均是由多种化感物质相互作用产生的结果,与化感物质和浓度有关^[34]。前人研究发现,化感物质中的对羟基苯甲酸、香草醛和阿魏酸三者之间存在拮抗作用^[35],因此进一步分析实葶葱与小飞蓬产生的复合他感作用的化感物质种类,某种程度上可以诠释拮抗作用产生的原因。

植物秸秆返田腐解可以改变土壤性质,调节土壤 pH 和离子交换量^[20],李增亮等^[36]研究发现在番茄连作土中添加大蒜和分蘖洋葱秸秆可以增加土壤 pH 值,降低土壤 EC 值,有利于改善土壤环境,并对番茄生长起到了促进作用。本研究中,混合腐解基质的 EC 值与菥蓂的株高、地上和地下部生物量以及根系活力表现出了显著或极显著正相关,pH 值与菥蓂的株高、地上部生物量积累和根系活力呈现显著或极显著负相关;混合腐解基质的 EC 值与马齿苋的株高、根长和生物量积累呈现显著或极显著负相关。研究表明实葶葱和小飞蓬的腐解改变了

生长基质的 EC 值和 pH 值,从而进一步影响植株高度和生物量的积累。本试验中,单一实葶葱腐解基质的电导率值随基质中实葶葱浓度增加,而有小飞蓬参与的腐解中,电导率值有不同程度降低,说明二者在腐解过程中就产生了拮抗效应。受体植物完成生活史后的混合腐解基质的 EC 值显著增加、pH 值显著降低的程度大于实葶葱同浓度下单一处理,考虑到新疆地区的土壤盐渍化严重且土质偏碱性^[37],混合腐解后 pH 值的降低或能改善土壤的栽培环境,这种改变会影响农田生态环境下植物的定居和扩散、多样性和稳定性^[1-4]。

4 结 论

1) 实葶葱和外来入侵植物小飞蓬的化感物质能通过腐解的方式进入农田生态系统中影响伴生植物生长。随着实葶葱分蘖株数的增加,对伴生植物菥蓂和马齿苋的株高、生物量积累、光合能力及根系活力的抑制作用增强;而小飞蓬产生的他感拮抗作用会减弱实葶葱产生的他感抑制作用,同时菥蓂与马齿苋面对实葶葱与小飞蓬的他感作用时产生不同的生长、生理响应。

2) 当伴生植物结束生活史之后,实葶葱单一腐解基质的电导率值增加,pH 值下降;实葶葱与小飞蓬混合腐解后这种变化增强。小飞蓬作为实葶葱种植地的入侵种,通过释放与实葶葱拮抗作用的化感物质从而影响实葶葱基质生长环境改变,进一步影响实葶葱伴生植物菥蓂和马齿苋的生物量积累、生活史的完成,对农田生态系统的物种多样性和稳定性造成影响。

参 考 文 献:

- [1] HUBÁLEK Z. Coefficients of association and similarity, based on binary (presence-absence) data: an evaluation [J]. *Biological Reviews*, 1982, 57(4): 669-689.
- [2] ZHANG H Y, GONCALVES P, COPELAND E, et al. Invasion by the weed *Conyza canadensis* alters soil nutrient supply and shifts microbiota structure [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 143: 107739.
- [3] BATISH D R, SINGH H P, KAUR S. Crop allelopathy and its role in ecological agriculture [J]. *Journal of Crop Production*, 2001, 4(2): 121-161.
- [4] 孔垂华. 植物种间和种内的化学作用 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2141-2150.
KONG C H. Inter-specific and intra-specific chemical interactions among plants [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2141-2150.
- [5] GUY-HAIM T, LYONS D A, KOTTA J, et al. Diverse effects of invasive ecosystem engineers on marine biodiversity and ecosystem functions: a global review and meta-analysis [J]. *Global Change Biology*,

- 2018, 24(3): 906-924.
- [6] VILÀ M, ESPINAR J L, HEJDA M, et al. Ecological impacts of invasive alien plants; a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(7): 702-708.
- [7] 郭文超, 吐尔逊, 周桂玲, 等. 新疆农林外来生物入侵现状、趋势及对策[J]. *新疆农业科学*, 2012, 49(1): 86-100.
GUO W C, TUXUN, ZHOU G L, et al. The status quo and trend of invasive alien species in agriculture & forest in Xinjiang, China and relevant countermeasures[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(1): 86-100.
- [8] 田丽丽, 马森. 引种新疆的加拿大一枝黄花对番茄的化感影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(11): 125-129.
TIAN L L, MA M. Allelopathy to *Lycopersicon esculentum* of *Solidago canadensis* after being introduced in Xinjiang[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, 22(11): 125-129.
- [9] 平亚飞, 朱建雯, 张振国. 黄花刺茄浸提液对番茄种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(3): 176-179.
PING Y F, ZHU J W, ZHANG Z G. Effects of *Solanum rostratum* on seed germination and seedling growth of tomato[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(3): 176-179.
- [10] 徐海根, 强胜. 中国外来入侵物种编目[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 162-163.
XU H G, QIANG S. Inventory invasive alien species in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 162-163.
- [11] YUAN X, WEN B. Seed germination response to high temperature and water stress in three invasive Asteraceae weeds from Xishuangbanna, SW China[J]. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0191710.
- [12] XI Y, LIU H G, JOHNSON D, et al. Selenium enhances *Conyza canadensis* phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(6): 2823-2835.
- [13] 王晓红, 纪明山. 入侵植物小飞蓬及其伴生植物的光合特性[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 71-77.
WANG X H, JI M S. Photosynthetic characteristics of an invasive plant *Conyza canadensis* and its associated plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 71-77.
- [14] SHERMAN A D, HARAMOTO E R, GREEN J D, et al. Integrating fall and spring herbicides with a cereal rye cover crop for horseweed (*Conyza canadensis*) management prior to soybean[J]. *Weed Technology*, 2020, 34(1): 64-72.
- [15] 肖春萍, 杨莉, 杨利民. 加拿大蓬的腐解物对两种供试植物的化感作用[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(12): 130-134.
XIAO C P, YANG L, YANG L M. Allelopathy effect of *Conyza canadensis* decomposition on two tested plants[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, 20(12): 130-134.
- [16] 张伟, 林辰壹, 李文静, 等. 野生实葶葱凋落叶片对 9 种作物种子萌发的影响[J]. *分子植物育种*, 2020, 18(15): 5127-5133.
ZHANG W, LIN C Y, LI W J, et al. Effects of the falling leaves of wild-type *Allium galanthum* on seed germination in nine crops[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(15): 5127-5133.
- [17] 杨柳青, 林辰壹, 王贝贝, 等. 野生实葶葱自然凋落叶片水浸提液对苜蓿种子萌发的他感作用[J]. *园艺学报*, 2019, 46(增刊 1): 2598.
YANG L Q, LIN C Y, WANG B B, et al. Allelopathic effect of aqueous extracts from natural withered leaves of *Allium galanthum* on seed germination of *Medicago sativa*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2019, 46(S1): 2598.
- [18] 张伟, 李文静, 林辰壹, 等. 实葶葱新叶水浸液对 10 种作物种子萌发的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(2): 112-119.
ZHANG W, LI W J, LIN C Y, et al. Effect of water extracts from fresh leaves of wild *Allium galanthum* on seed germination of ten crops[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(2): 112-119.
- [19] 陈昱, 张福建, 范淑英, 等. 秸秆腐解物对豇豆连作土壤性质及幼苗生理指标的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(7): 1472-1479.
CHEN Y, ZHANG F J, FAN S Y, et al. Effects of crop straw decomposition on the soil properties of the continuous cropping cowpea and the seedling physiological indexes[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(7): 1472-1479.
- [20] 杨冬艳, 桑婷, 冯海萍, 等. 番茄与辣椒秸秆不同还田方式对茄果类蔬菜幼苗生长的影响[J]. *福建农业学报*, 2020, 35(3): 273-279.
YANG D Y, SANG T, FENG H P, et al. Effect of returning tomato and cayenne straws to field on growth of solanaceous vegetable seedlings[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35(3): 273-279.
- [21] 齐永志, 孙雅如, 王冰, 等. 草莓根系分泌物和腐解物化感作用研究进展[J]. *园艺学报*, 2021, 48(4): 778-790.
- [22] 新疆维吾尔自治区统计局, 国家统计局新疆调查总队. 新疆统计年鉴: 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019: 47-48.
Statistics Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Survey Corps of the National Bureau of Statistics. Xinjiang statistical yearbook: 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019: 47-48.
- [23] BASHIR T, ANUM W, ALI I, et al. Allelopathic effects of perennial sow thistle (*Sonchus arvensis* L.) on germination and seedling growth of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Allelopathy Journal*, 2018, 43(1): 105-116.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 167-170.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 167-170.
- [25] 蔡庆生. 植物生理学实验[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013: 44-103.
CAI Q S. Plant physiology experiments[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013: 44-103.
- [26] WILLIAMSON G B, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14(1): 181-187.
- [27] 宋文静, 张伟, 骆桂法, 等. 藏药葶莫子的定性、定量方法研究[J]. *中国药房*, 2019, 30(13): 1816-1821.
SONG W J, ZHANG W, LUO G F, et al. Qualitative and quantitative study of tibetan medicine *Thlaspi* semen[J]. *China Pharmacy*, 2019, 30(13): 1816-1821.
- [28] GALLO M, CONTE E, NAVIGLIO D. Analysis and comparison of the antioxidant component of *Portulaca oleracea* leaves obtained by different solid-liquid extraction techniques[J]. *Antioxidants*, 2017, 6(3): 64.