

杨树根际土壤水浸提液对3种农作物的化感效应

陈莉莎^{1,2}, 张金池¹, 陆茜¹, 卓为君³, 李梅花³, 李世昌³

(1. 南京林业大学林学院, 江苏南京 210037; 2. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏南京 210006 3. 江苏省丰县农林局, 江苏丰县 221700)

摘要: 杨树 *Populus* 长期连作产生土壤恶化和土地生产力逐代降低的现象。以江苏省徐州丰县大沙河林场杨树多代连作人工林为研究对象, 不同连栽代次的杨树根际土壤水浸提液稀释成不同质量浓度(100, 150, 200, 500, 800, 1 000 g·L⁻¹)后处理莴苣 *Lactuca sativa*, 小麦 *Triticum aestivum*, 玉米 *Zea mays* 等的种子及幼苗, 重复 3 次·处理⁻¹, 探索杨树连栽其根系分泌物中化感物质活性, 以期为农林复合系统的合理构建及优化提供一定依据。结果表明: 杨树根际土壤水浸提液质量浓度较低时, 对莴苣及小麦种子萌发及幼苗生长具促进作用, 质量浓度增加, 促进作用减弱, 超过临界质量浓度, 转为抑制作用, 且随质量浓度的增高而加强; 而本研究采用的各质量浓度浸提液对玉米始终表现为抑制作用。从杨树连栽代次上看, 在临界质量浓度以上萌发率随连栽代次增加而减小, 芽、根长也逐代减短, 在临界质量浓度以下反之; 总体上, 浸提液对3种农作物种子芽及根的负化感效应逐代增强, 抑制作用逐渐增大。综合化感效应指数表现出随着杨树连栽代次的增加而化感作用有增强的趋势, 最高与最低综合化感隶属函数值间相差 3.384~3.808。图 1 表 3 参 30

关键词: 农林生态系统; 杨树; 连作; 根际; 水浸提液; 化感效应

中图分类号: S718.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2015)02-0264-08

Allelopathy of aqueous extracts when intercropping in poplar rhizosphere soil

CHEN Lisha^{1,2}, ZHANG Jinchi¹, LU Qian¹, ZHUO Weijun³, LI Meihua³, LI Shichang³

(1. College of Forest, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co. Ltd, Nanjing 210006, Jiangsu, China; 3. Agriculture and Forestry Bureau at Fengxian, Fengxian 221700, Jiangsu, China)

Abstract: To explore the allelochemical activity of poplar root exudates and to provide a basis for constructing reasonable agroforestry systems, aqueous extracts of different successive poplar rhizosphere soils were diluted to different concentrations (100, 150, 200, 500, 800, 1 000 g·L⁻¹) for application on seeds and seedlings of lettuce, wheat, and corn with three replication every treatment. The study was conducted on continuous cropping in a poplar plantation in Da Shahe Forest Farm in Fengxian County, Xuzhou City, Jiangsu Province. Results showed that when the aqueous extract of polar rhizosphere soil was at a low concentration, lettuce and wheat seed germination and seedling growth were promoted. With increasing concentration promotion decreased, and when a critical concentration was exceeded growth was inhibited. The inhibition further increased with increasing concentrations. For corn seed germination and seedlings the aqueous extract always inhibited growth. Above the critical concentration, germination rates gradually decreased with succeeding generations as did shoot and root length; whereas below the critical concentration they gradually increased. For both lettuce shoots and let-

收稿日期: 2014-03-25; 修回日期: 2014-05-20

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(20110468); 江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641)

作者简介: 陈莉莎, 从事水土保持及生态工程研究。E-mail: aprilsha@126.com。通信作者: 张金池, 教授, 博士, 博士生导师, 从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: nfujczhang@sina.com

tuce roots, negative allelopathic effects gradually increased with each generation. Comprehensive allelopathic effects of poplar root exudates on crop growth increased with each generation. The difference values between the highest and the lowest comprehensive allelopathic effect was 3.384 3–3.808 8. [Ch, 2 fig. 3 tab. 30 ref.]

Key words: agoforestry ecosystem; poplar; continuous cropping; rhizosphere; aqueous extract; allelopathic effect

根系分泌物是保持根际微域生态系统活力的关键因素,也是根际微生态系统中物质迁移和调控的重要组成部分^[1],对根际养分的转化和土壤微生物区系的影响已得到广大学者的普遍认可^[2-3]。如 Degryse 等^[4]研究表明双子叶植物根分泌物可以促进铜和锌的吸收。而根系分泌物中的化感物质进入土壤后,可直接或间接地对周围植物的生长产生影响,甚至引起自毒作用^[5-7]。Rice^[8]已于 1984 年就在他的专著 *Allelopathy* 中对这种现象定义为化感作用。近年来针对杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 桉树 *Eucalyptus*, 马尾松 *Pinus massoniana*, 杨树 *Populus* 等树种化感自毒问题,研究者们开展了大量研究工作^[9],化感作用已成为影响森林天然更新的重要因子。酚酸类化感物质是目前林木化感研究最多的一类物质^[10-11]。混农林业一直被认为可以给农田带来大量营养,木本植物与农作物相比对营养的要求较低,但后来人们开始观察其分泌物是否对农作物有影响^[12-16]。目前,中国对作物品种间化感作用差异的研究对象有水稻 *Oryza sativa*, 小麦 *Triticum aestivum*, 辣椒 *Capsicum annuum* 等作物^[17-18],也有一些学者研究了蔬菜与杂草之间的化感作用^[19],为新品种作物定向选育提供理论参考。化感作用的研究有助于更加合理地解释生态系统中植物组成与分布、群落演替、协同进化和生物入侵等现象,在林业生产的森林更新、混交林培育中有时会起到决定性作用^[20]。杨树是中国主要工业用材林和防护林种之一,其人工林总面积在中国已达 700 万 hm²^[21]。但由于长期连作产生土壤恶化和土地生产力逐代降低的现象^[22],且杨树与农作物的复合系统中种植作物种类繁多,选择存在极大的盲目性^[7]。目前,关于杨树根系分泌物的化感效应及其对农作物的影响的研究报告还有待完善,为减缓地力衰退,有效地指导构建合理农林复合系统,本研究以不同代次杨树林根际土壤水浸液为供体,无菌水为对照,以莴苣 *Lactuca sativa*, 小麦和玉米 *Zea mays* 等种子为受体,通过对作物种子萌发和幼苗生长等各项生理指标的测定,采用化感效应指数和综合化感效应指数及差异性检验评价供体对受体的化感效应,探索杨树连栽其根系分泌物对作物种子萌发和幼苗生长的影响,探讨杨树连作地力衰退机理,以期为合理构建及优化农林复合系统提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

研究区位于江苏省徐州市西北部的丰县大沙河林场(34°79'N, 116°57'E)。地处黄泛冲积平原,地势平缓,属暖温带半湿润季风气候,年均气温为 14 ℃,年日照时数为 2 284~2 495 h,日照率 52%~57%,年均无霜期约 200 d,年均降水量约 784 mm,雨季降水量占全年的 56%。

本研究根据实验目的,采用空间位移法,在研究区内选取林地抚育和管理措施较一致的杨树 1 代(I, 树木栽植年限约为 10 a),2 代(II, 树木栽植年限约为 30 a),3 代(III, 树木栽植年限约为 40 a)林为试验样地,除 3 代林的第一代为意大利引进美洲黑杨无性系 69 杨 *Populus deltoids* ‘I-69/55’ 外,杨树品种均为意大利引进欧美杨无性系 72 杨 *P. × euramericana* ‘San Martino’。样地具体特征见表 1。

表 1 试验样地基本特征状况

Table 1 Characteristic of the testing forests

连栽代次	类型	树龄/a	树高/m	胸径/cm	株行距/(m×m)	土壤容重/(g·cm ⁻³)
I	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> -杨	10	14.7	20.09 ± 4.56	3.0 × 5.0	1.46 ± 0.07
II	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i> -杨-杨	7	13.0	18.47 ± 3.47	3.5 × 7.0	1.49 ± 0.11
III	刺槐-杨-杨-杨	7	12.3	18.11 ± 2.55	3.0 × 3.0	1.49 ± 0.07

供试土壤取样:2012 年 9 月 20 日,在大沙河林场 3 处试验样地采用抖落法分别采集直径<0.5 cm 的杨树细根上附着的土壤(1~2 mm)作为根际土根际土壤,过 0.25 mm 筛去除根际土中残留杨树根等,

混匀风干备用。

水浸液制备：取风干供体材料杨树根际土壤250 g，加入无菌水250 mL，室温振荡5 h，静置24 h后取上层清液，3层滤纸过滤，再经0.45 μm滤膜过滤(以获得不含微生物的母液)，得1:1原液，由此配置成100, 150, 200, 500, 800, 1 000 g·L⁻¹的土壤浸提液，置于4 °C冰箱保存。

1.2 方法

将莴苣、小麦、玉米种子用质量浓度为3.0 g·L⁻¹的高锰酸钾溶液浸泡消毒30 min，以室温下的灭菌水浸泡24 h备用，中间换水1次。在事先灭菌的直径Ø9 cm的玻璃培养皿中垫入2层滤纸，取预处理过的50粒种子均匀摆放在滤纸上(玉米种子20粒)，在滤纸上滴加处理液或对照液(无菌水，ck)使滤纸充分浸湿，设重复3个·组⁻¹，放入MLR-315型程控光照培养箱，温度为(25±1) °C，湿度为(60±2)%，10 h光照，进行发芽试验。添加等量的处理液 $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$ ，以胚根突破种皮1~2 mm为种子发芽的标准^[23]，24 h观测记录萌发种子数，持续7 d后测量萌发率、幼苗芽长、根长和鲜质量等指标，并计算综合化感隶属函数值。公式如下：萌发率(%)=(发芽终期萌发种子数/供试种子数)×100%。获得的原始数据均转化为化感效应指数(参照Williamson等^[24]的方法)进行分析，公式为： $I_R(\%) = (T_1/T_0 - 1) \times 100\%$ 。 I_R 为化感效应指数，即参试物质的生物学效应大小， T_0 为对照值， T_1 为处理值。当 $T_1 \leq T_0$ 时， $I_R < 0$ ，抑制作用；当 $T_1 \geq T_0$ 时， $I_R > 0$ ，促进作用。

化感隶属函数值用模糊数学隶属函数值的方法计算^[25]。公式如下： $X_{(ij)} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}}$ 。其中： $X_{(ij)}$ 表示第*i*类型*j*指标的化感隶属值， X_{ij} 表示第*i*类型*j*指标的测定值， $X_{j\max}$ 和 $X_{j\min}$ 为*j*指标的最大测定值与最小测定值。 $M_i = \sum X_{(ij)}$ 。等中： M_i 表示第*i*类型的综合化感隶属值。

1.3 数据处理

用Excel对数据进行初步处理并绘图，用SPSS 17.0软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，采用Duncan's新复极差法，将在P<0.05水平上具有差异性的处理看作具有明显抑制或者促进作用，不具备差异性的只视为具有抑制或促进的趋势。

2 结果与分析

2.1 杨树根际土水浸提液对3种作物种子萌发的化感效应

从杨树根际土水浸提液质量浓度角度分析表2，除小麦种子在质量浓度低于0.20 g·mL⁻¹的处理下，最终萌发率随质量浓度增大而升高外，其余处理下各类种子的最终萌发率均表现为随水浸提液质量浓度的增大而逐步降低，且均低于对照(ck)值。其中，莴苣、小麦种子最低值均为处理Ⅲ_(1 000)(下标括号内为处理液质量浓度g·L⁻¹，下同)，分别比对照值低44.52%和48.30%；玉米种子在处理Ⅲ₍₈₀₀₎时出现0萌发状况，当质量浓度继续提高时，Ⅰ_(1 000)、Ⅱ_(1 000)和Ⅲ_(1 000)均表现出0萌发。

从杨树连栽代数角度分析表2，莴苣、小麦种子在杨树根际土水浸提液质量浓度低于200 g·L⁻¹的处理下，最终萌发率均随代次增加而升高，其中升高幅度莴苣种子为0.74%~4.41%，小麦种子为0.88%~7.40%；质量浓度在200 g·L⁻¹以上的处理下，最终萌发率表现为逐代降低，其中降低幅度莴苣种子为1.71%~14.73%，小麦种子为8.52%~19.74%；玉米种子最终萌发率始终表现为逐代降低，降低幅度为8.69%~66.60%。

计算作物种子萌发率化感效应值，得出化感效应指数 I_R 均小于0，表明各质量浓度的杨树根际土壤水浸提液对作物种子萌发均起到抑制作用；且随着质量浓度的增大，对莴苣、玉米种子萌发率的抑制作用呈逐渐加强的态势，对小麦种子萌发率的抑制作用多表现为抑制作用随着浓度的增大先减弱再增强。究其原因，可能是根际土壤水浸提液对小麦种子萌发产生类似低促高抑的现象，但是由于本研究对照组萌发率较高，从而分析出的 I_R 值都表现为负值。

在莴苣和小麦种子萌发率的化感效应指数 I_R 分析中，随着杨树连栽代次的增加，根际土壤水浸提液对莴苣和小麦种子的抑制作用有低浓度逐代减弱、高浓度逐代增强的趋势。而对玉米种子的抑制作用则表现为逐代增强的趋势，且处理Ⅲ₍₈₀₀₎，Ⅰ_(1 000)，Ⅱ_(1 000)和Ⅲ_(1 000)的玉米种子未发芽，对玉米种子萌发

率的抑制作用均达到了100%。

表2 杨树根际土水浸液对作物种子最终萌发率的影响

Table 2 Effect of water extract of poplar rhizosphere soil on final seed germination rate

浸提液质量浓度/(g·L ⁻¹)	代次	莴苣种子		小麦种子		玉米种子	
		最终萌发率/%	化感效应指数	最终萌发率/%	化感效应指数	最终萌发率/%	化感效应指数
0(ck)		97.33 ± 1.15		78.67 ± 7.57		61.67 ± 7.57	
100	I	90.00 ± 4.00	-7.53	67.33 ± 4.16	-14.41	45.00 ± 5.00	-27.03
	II	90.67 ± 1.15	-6.84	72.00 ± 5.29	-8.48	38.33 ± 2.89	-37.85
	III	94.67 ± 1.15	-2.73	77.33 ± 3.06	-1.70	30.00 ± 5.77	-51.35
150	I	86.67 ± 4.62	-10.95	70.00 ± 1.15	-10.26	38.33 ± 2.89	-37.85
	II	88.67 ± 2.31	-8.90	74.67 ± 4.62	-4.27	35.00 ± 5.00	-43.25
	III	90.67 ± 2.31	-6.84	75.33 ± 4.62	-3.42	26.67 ± 2.89	-56.75
200	I	86.67 ± 1.15	-10.95	68.67 ± 3.06	-11.96	31.67 ± 2.89	-48.65
	II	88.67 ± 3.06	-8.90	70.67 ± 4.16	-9.40	23.33 ± 2.89	-62.17
	III	85.33 ± 1.15	-12.33	66.67 ± 6.43	-14.53	20.00 ± 0	-67.57
500	I	78.00 ± 2.00	-19.86	62.67 ± 3.06	-19.65	13.33 ± 5.00	-78.39
	II	76.67 ± 4.16	-21.23	57.33 ± 1.15	-26.50	8.33 ± 2.89	-86.49
	III	70.67 ± 1.15	-27.39	50.67 ± 4.16	-35.04	3.33 ± 2.89	-94.60
800	I	70.00 ± 2.00	-28.08	59.33 ± 6.11	-23.94	5.00 ± 0	-91.89
	II	65.33 ± 5.03	-32.88	53.33 ± 1.15	-31.63	1.67 ± 2.89	-97.29
	III	61.33 ± 3.06	-36.99	44.67 ± 3.06	-42.73	0	-100
1 000	I	68.00 ± 2.00	-30.13	60.67 ± 4.16	-22.22	0	-100
	II	63.33 ± 3.06	-34.93	50.67 ± 2.31	-35.04	0	-100
	III	54.00 ± 5.29	-44.52	40.67 ± 3.06	-47.86	0	-100

说明: 表中值为平均值±标准差。

2.2 杨树根际土壤水浸提液对3种作物幼苗生长的化感效应

根是作物吸收矿质和水分的营养器官, 其生长状况制约着作物的生长发育^[17]。对培养第7天的3种作物种子的芽长和根长测量后计算化感效应指数, 结果见图1。杨树根系分泌物对莴苣、小麦芽长及根长的化感效应表现为较低质量浓度时促进, 较高质量浓度时逐渐转为抑制。但不同杨树连栽代次其化感效应的正负转折质量浓度不同, 对莴苣芽而言, 杨树连栽代次I的正负转折质量浓度为800 g·L⁻¹, II和III为500 g·L⁻¹; 对莴苣根而言, 杨树连栽代次I的正负转折质量浓度为500 g·L⁻¹, II和III为200 g·L⁻¹。对小麦芽而言, 杨树连栽代次I的正负转折质量浓度为200 g·L⁻¹, II和III为150 g·L⁻¹; 对小麦根而言, 杨树连栽代次I, II和III的正负化感效应转折质量浓度同莴苣根, 而对玉米芽长及根长的化感效应始终表现为抑制, 且抑制强度随质量浓度的增大而增强。

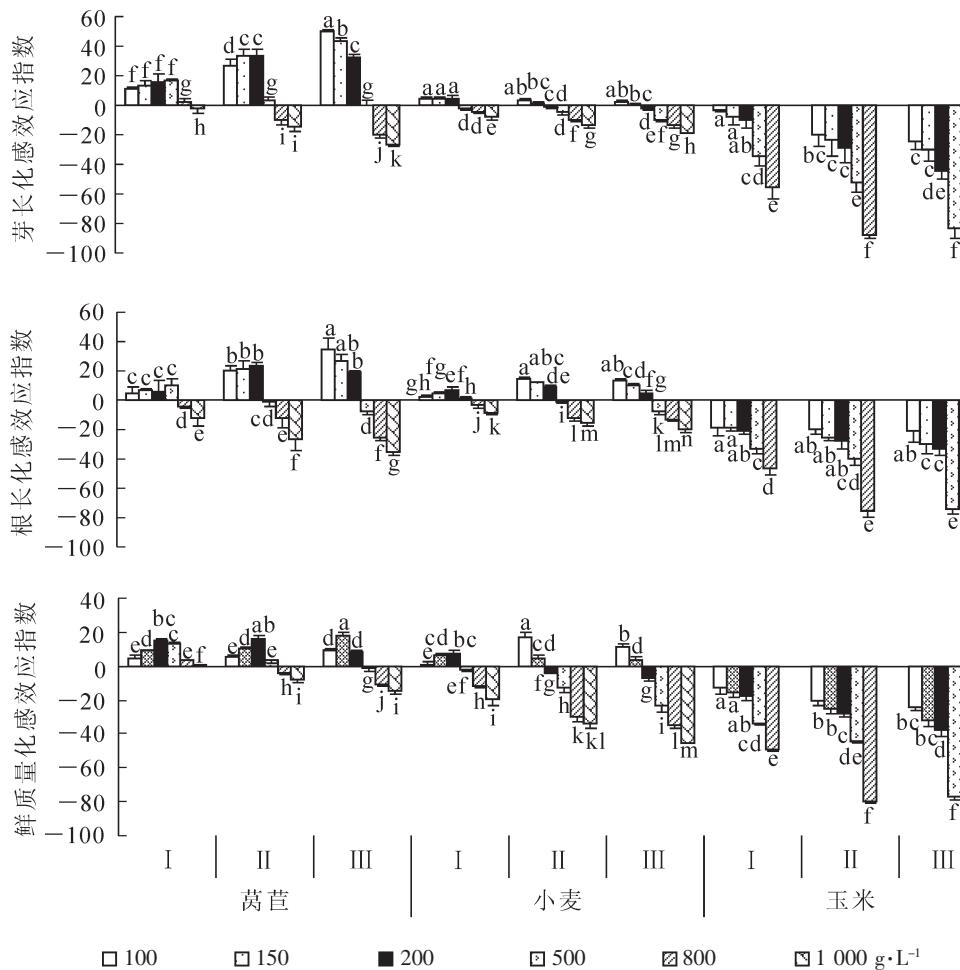
从连栽代次上, 对莴苣芽及根的正、负化感效应均逐代增强; 对小麦芽的正化感效应逐代减弱, 对小麦根的正化感效应II>III>I, 而负化感效应则均是逐代增强; 对玉米芽及根的化感效应逐代增强, 抑制作用逐渐增大。

2.3 杨树根际土壤水浸提液对3种作物幼苗生物量的化感效应

对培养第7天的作物种子鲜质量测量后计算化感效应指数, 结果见图1。杨树1代林(I)根际土壤水浸提液对莴苣幼苗鲜质量的化感效应均表现为促进作用, 作用强度随质量浓度的升高先增大后减小; II代和III代对莴苣幼苗鲜质量的化感效应在低质量浓度表现为促进作用, 而高质量浓度时则为抑制作用, 是典型的低促高抑现象。低质量浓度时质量浓度越高其正化感作用越强, 高质量浓度时化感作用由正转为负, 且负化感作用随浓度升高而加强。I代, II代和III代对小麦幼苗鲜质量的化感效应均表现为低促高抑; 而对玉米幼苗鲜质量则始终表现为抑制作用, 且随着质量浓度的增加, 负化感效应越来越强。

从杨树连栽代次上, 对莴苣及小麦幼苗鲜质量的正化感效应无显著规律, 其负化感效应则始终为III>II>I。而对玉米幼苗鲜质量的负化感效应始终表现为逐代增强。由此表明, 随着杨树连栽代次的增

加, 对作物幼苗鲜质量的负化感效应增强。



图中值为平均值±标准差, 条形图上标注的字母为各作物内数据间的Duncan's新复极差检
测结果, 不同英文字母表示差异达5%水平上显著。

图1 杨树根际土水浸提液对幼苗芽长、根长及鲜质量的化感效应

Figure 1 Allelopathic effects of the water extract of poplar rhizosphere soil on germ length, radicle length and fresh weight

2.4 杨树根际土壤水浸提液对3种作物的综合化感效应

由于单一指标不能全面反映杨树根际土壤水浸提液对作物种子的化感效应大小。对作物的芽长、根长、鲜质量、发芽率等4个指标进行化感隶属函数值的计算后, 求其综合化感隶属函数值(M_i , 下标*i*表示处理种类), 结果见表3。综合化感隶属函数值可以综合多方指标对化感效应强度进行评价, 而处理综合化感隶属函数值与对照综合化感隶属函数值差距越大, 表明化感效应越强, 其中处理综合化感隶属函数值高于对照(ck)表现为正化感效应, 低于对照表现为负化感效应, 即综合隶属函数值越大, 对作物生长的促进作用越大, 越有益; 反之抑制作用越大, 越有害。临界质量浓度指处理综合化感隶属函数值由高于对照综合化感隶属函数值转为低于该值的质量浓度, 即化感作用由促进转为抑制的质量浓度。

对于莴苣种子及其幼苗生长, M_1 和 M_{II} 均是随着浸提液质量浓度的升高先上升后下降, M_{III} 则是持续下降。杨树1代林(I)根际土壤水浸提液的临界质量浓度均为500 g·L⁻¹, 在此质量浓度及以下 M_1 比 M_{ck} 高8.28%~21.64%, 在此质量浓度以上 M_1 比 M_{ck} 低24.44%~37.37%; II和III的临界质量浓度均为200 g·L⁻¹, 在此质量浓度及以下 M_{II} 比 M_{ck} 高27.86%~45.99%, M_{III} 比 M_{ck} 高28.61%~59.06%, 在此质量浓度以上 M_{II} 比 M_{ck} 低14.78%~69.19%, M_{III} 比 M_{ck} 低33.11%~100%, 质量浓度达到1000 g·L⁻¹时, M_{III} 最小, 为0。从杨树连栽代次上, 其根际土壤水浸提液各质量浓度下莴苣种子及其幼苗生长综合化感隶属函数值排序如下: $III_{(100)} > III_{(150)} > II_{(200)} > II_{(150)} > III_{(200)} > I_{(200)} > I_{(500)} > I_{(100)} > ck > II_{(500)} > I_{(800)} > III_{(500)} > I_{(1000)} > II_{(800)} > II_{(1000)} > III_{(800)} > III_{(1000)}$ 。由此排序可以看出, 正化感作用最强的是杨树3代林(III)

根际土壤水浸提液的 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理, 最弱的是杨树1代林(I)100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理; 负化感作用最强的是代次Ⅲ的1000 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理, 最弱的是代次Ⅱ的500 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理。综合化感隶属函数值最高与最低值间相差3.673 3。

表3 杨树根际土壤水浸提液对3种作物的综合化感隶属函数值

Table 3 Comprehensive subordinative function value of water extract of rhizosphere soil poplar on 3 crop species

浸提液质量 浓度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	莴苣			小麦			玉米		
	M_1	M_{II}	M_{III}	M_1	M_{II}	M_{III}	M_1	M_{II}	M_{III}
0(ck)	2.309 4			3.139 1			4.000 0		
100	2.500 7	2.952 8	3.673 3	3.004 6	3.808 8	3.725 9	3.384 3	3.021 7	2.768 8
150	2.607 0	3.166 7	3.665 4	3.312 1	3.484 5	3.386 9	3.195 9	2.826 4	2.521 7
200	2.809 1	3.371 5	2.970 1	3.358 4	3.053 3	2.715 7	3.017 8	2.541 2	2.172 8
500	2.622 6	1.968 0	1.544 8	2.613 1	2.123 1	1.350 2	2.207 4	1.764 9	0.706 6
800	1.745 0	1.137 6	0.520 3	2.099 9	1.186 2	0.722 3	1.567 7	0.591 0	0.000 0
1000	1.446 3	0.711 5	0.000 0	1.761 9	0.817 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

对于小麦种子及其幼苗生长, M_1 随着浸提液质量浓度的升高先增大后减小, 临界质量浓度为200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 在此质量浓度以下时, M_1 高于 M_{ck} 5.51%~6.99%(但100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理除外), 在此质量浓度以上, M_1 低于 M_{ck} 16.76%~43.87%; M_{II} 和 M_{III} 均是随着质量浓度的升高而减小, 当质量浓度 $\leq 150\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, M_{II} 比 M_{ck} 高11.00%~21.33%, M_{III} 比 M_{ck} 高7.89%~18.69%; 当质量浓度 $> 150\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, M_{II} 比 M_{ck} 低2.73%~73.97%, M_{III} 比 M_{ck} 低13.49%~100%; 质量浓度达到1000 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, M_{III} 最小, 为0。从杨树连栽代次上, 其根际土壤水浸提液各质量浓度下小麦种子及其幼苗生长综合化感隶属函数值排序如下: $\text{II}_{(100)} > \text{III}_{(100)} > \text{II}_{(150)} > \text{III}_{(150)} > \text{I}_{(200)} > \text{I}_{(150)} > \text{ck} > \text{II}_{(200)} > \text{I}_{(100)} > \text{III}_{(200)} > \text{I}_{(500)} > \text{II}_{(500)} > \text{I}_{(800)} > \text{I}_{(1000)} > \text{II}_{(800)} > \text{III}_{(500)} > \text{II}_{(1000)} > \text{III}_{(800)} > \text{III}_{(1000)}$ 。由此排序可以看出: 正化感效应最强的是杨树2代林(Ⅱ)根际土壤水浸提液的100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理, 最弱的是杨树1代林(I)150 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理; 负化感效应最强的是杨树3代林(Ⅲ)1000 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理, 最弱的是杨树2代林(Ⅱ)的200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理。综合化感隶属函数值最高与最低值间相差3.808 8。

对于玉米种子及幼苗生长, M_1 , M_{II} 和 M_{III} 均随着浸提液质量浓度的升高而减小, 且均低于 M_{ck} , M_1 比 M_{ck} 低15.39%~100%, M_{II} 比 M_{ck} 低24.46%~100%, M_{III} 比 M_{ck} 低30.78%~100%。从杨树连栽代次上, 其根际土壤水浸提液各质量浓度下玉米种子及其幼苗生长综合化感隶属函数值排序如下: $\text{ck} > \text{I}_{(100)} > \text{I}_{(150)} > \text{II}_{(100)} > \text{I}_{(200)} > \text{II}_{(150)} > \text{III}_{(100)} > \text{II}_{(200)} > \text{III}_{(150)} > \text{I}_{(500)} > \text{III}_{(200)} > \text{II}_{(500)} > \text{I}_{(800)} > \text{III}_{(500)} > \text{II}_{(800)} > \text{I}_{(1000)} = \text{II}_{(1000)} = \text{III}_{(800)} = \text{III}_{(1000)}$ 。由此排序可以看出, 杨树连栽对玉米种子及其幼苗生长均呈现抑制作用, 综合化感隶属函数值最高与最低值间相差4.000 0。负化感效应最弱的是杨树1代林(I)的100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理, 最强的是杨树1代林(I), 2代林(Ⅱ), 3代林(Ⅲ)的1000 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理及3代林(Ⅲ)的800 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理, 最弱与最强处理间的综合化感隶属函数值相差3.384 3。

3 结论与讨论

从杨树根际土壤水浸提液质量浓度上看, 本研究结果表现出低质量浓度促进种子萌发及幼苗生长, 高质量浓度抑制种子萌发及幼苗生长的现象, 与祝心如等^[18,27-28]的研究结果相似, 但化感效应的作用质量浓度差异较大, 这是由于浸提液及浸提对象差异所致, 且外在环境和树种本身的生长状况都会影响化感作用的效果^[7]。赵大君等^[29]在研究植物根系分泌物组分时认为, 分泌物各组分之间, 尤其是在分泌物的毒性成分之间或毒性成分与其他成分之间可能存在协同、促进或抵消等作用关系。由此推测, 低促高抑现象可能是由于根系分泌物各组分间的相互作用在不同质量浓度下表现不同, 低质量浓度时, 可能促进成分占主导作用, 高质量浓度时, 抑制成分占主导作用, 也可能是有些化感物质其本身质量浓度较低时对作物生长起促进作用, 超过临界质量浓度反而起到抑制作用, 但以上推论需进一步研究验证。

从杨树代次上看, 本研究结果表现出综合化感效应逐代加强的现象, 这是由于杨树多代连栽后, 土壤微域中的化感物质得到累积, 化感作用加强, 不利于作物的生长。不同代次杨树根系分泌物对农作物的化感作用研究目前还较少, 万开元等^[28]对不同树龄杨树的研究表明: 随着杨树树龄增大, 其根际土壤

水浸提物对莴苣种子的化感抑制作用明显增强，这同样说明杨树长期种植的弊端。

从农作物种类上看，对3种作物种子的萌发及幼苗生长均有负化感效应逐代增强的趋势，但不同作物对浸提液中化感物质的响应并不完全相同，体现出种类差异，这对农林复合系统的完善具有参考价值。有研究^[3,30]表明：植物根系分泌的某些化感物质可能直接影响了植物的一系列生理生化过程，如改变细胞膜透性以影响离子吸收、降低叶绿素含量以减弱光合作用等，从而最终对种子的萌发及幼苗的生长起到抑制作用。野外化感物质实际浓度确定的困难性在一定程度局限了化感物质的研究，但可以肯定的是，在实际林农间作时，应避免杨树连栽，可适当更换杨树品种或进行树种轮栽以减轻对作物的影响，选择农作物种类时也应避免对杨树根际分泌的化感物质敏感的物种，以保证农作物产量。

4 参考文献

- [1] 张福锁, 杨天桥. 环境胁迫与植物根际营养[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [2] 贺永华, 沈东升, 朱荫媚. 根系分泌物及其根际效应[J]. 科技通报, 2006, 22(6): 761–766.
HE Yonghua, SHEN Dongsheng, ZHU Yinmei. Root exudates and their rhizospheric effects [J]. *Bull Sci Technol*, 2006, 22(6): 761–766.
- [3] 陈龙池, 廖利平, 汪思龙, 等. 根系分泌物生态学研究[J]. 生态学杂志, 2002, 21(6): 57–62.
CHEN Longchi, LIAO Liping, WANG Silong, et al. A review for research of root exudates ecology [J]. *Chin J Ecol*, 2002, 21(6): 57–62.
- [4] DEGRYSE F, VERMA V K, SMOLDERS E. Mobilization of Cu and Zn by root exudates of dicotyledonous plants in resin-buffered solutions and in soil [J]. *Plant Soil*, 2008, 306(2): 69–84.
- [5] YU Jingquan, MATSUI Y. Effects of root exudates of cucumber (*Cucumis sativus*) and allelochemicals on ion uptake by cucumber seedlings [J]. *J Chem Ecol*, 1997, 23(3): 817–827.
- [6] 马祥庆, 刘爱琴, 黄宝龙. 杉木人工林自毒作用研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2000, 24(1): 12–16.
MA Xiangqing, LIU Aiqin, HUANG Baolong. A study on self-poisoning effects of Chinese fir plantation [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2000, 24(1): 12–16.
- [7] 万开元, 陈防, 余常兵, 等. 杨树-农作物复合系统中的化感作用[J]. 生态科学, 2005, 24(1): 57–60.
WAN Kaiyuan, CHEN Fang, YU Changbing, et al. Allelopathy and its application in poplar-corps system [J]. *Ecol Sci*, 2005, 24(1): 57–60.
- [8] RICE E L. *Allelopathy* [M]. 2 ed. New York: Academic Press, 1984.
- [9] 王延平, 王华田. 连作人工林化感效应研究综述[J]. 世界林业研究, 2008, 21(4): 25–30.
WANG Yanping, WANG Huatian. Research advances on allelopathy of continuous cropping plantation [J]. *World For Res*, 2008, 21(4): 25–30.
- [10] RIMANDO A M, OLOFSDOTTER M, DUKE S O. Searching for rice allelochemicals: an example of bioassays-guided isolation [J]. *Agric J*, 2001, 93: 16–20.
- [11] OHNO T. Oxidation of phenolic acid derivatives by soil and its relevance to allelopathic activity [J]. *J Environ Qual*, 2001, 30(5): 1631–1635.
- [12] 袁玉欣, 裴保华, 王九龄, 等. 国外混农林业系统中林木与农作物的相互关系研究进展[J]. 世界林业研究, 1999, 12(6): 13–17.
YUAN Yuxin, PEI Baohua, WANG Jiuling, et al. A review to interaction between tree and crop in agroforestry system [J]. *World For Res*, 1999, 12(6): 13–17.
- [13] SWAN C M, HEALEY B, RICHARDSON D C. The role of native riparian tree species in decomposition of invasive tree of Heaven (*Ailanthus altissima*) leaf litter in an urban stream [J]. *EcoScience*, 2008, 15(1): 27–35.
- [14] BURCH P L, ZEDAKER S M. Removing the invasive tree *Ailanthus altissima* and restoring natural cover [J]. *J Arboricul*, 2003, 29(1): 18–24.
- [15] CHON Sanguk, CHOI Seongkyu, JUNG Sunyo, et al. Effects of alfalfa leaf extracts and phenolic allelochemicals on early seedling growth and root morphology of alfalfa and barnyard grass [J]. *Crop Prot*, 2002, 20(10): 1077–1082.
- [16] 阎飞, 杨振明, 韩丽梅. 论农业持续发展中的化感作用[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 633–635.

- YAN Fei, YANG Zhenming, HAN Limei. Allelopathy in sustainable development of agriculture [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, **12**(4): 633 – 635.
- [17] 张素勤, 耿广东, 陈西海. 不同辣椒品种的化感作用研究[J]. 中国种业, 2007(9): 39 – 40.
- ZHANG Suqin, GENG Guangdong, CHEN Xihai. Allelopathic research on different chili varieties [J]. *China Seed Ind*, 2007(9): 39 – 40.
- [18] 祝心如, 王大力, 苹果、杨树等林木根系浸取物对小麦生长的潜在影响[J]. 植物生态学报, 1997, **21**(3): 226 – 233.
- ZHU Xinru, WANG Dali. Potential effect of extracts of roots of *Malus pumila* and *Populus canadensis* on wheat growth [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1997, **21**(3): 226 – 233.
- [19] 李大伟, 贾庆利, 巩振辉. 植物化感作用在蔬菜作物上的表现及其应用[J]. 陕西农业科学, 2004(4): 40 – 43.
- LI Dawei, JIA Qingli, GONG Zhenhui. Manifestation and application of allelopathy in vegetable crops [J]. *Shaanxi Agric Sci*, 2004(4): 40 – 43.
- [20] 彭少麟, 邵华. 化感作用的研究意义及发展前景[J]. 应用生态学报, 2001, **12**(5): 780 – 786.
- PENG Shaolin, SHAO Hua. Research significance and foreground of allelopathy [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, **12**(5): 780 – 786.
- [21] 方升佐. 中国杨树人工林培育技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(3): 613 – 618.
- FAGN Shengzuo. Silviculture of poplar plantation in China: a review [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(3): 613 – 618.
- [22] 孔令刚, 王华田, 姜岳忠, 等. 杨树不同品种更替连作对林地土壤生化特性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(5): 69 – 72.
- KONG Linggang, WANG Huatian, JIANG Yuezhong, et al. Effect of alternative continuous cropping of different poplar cultivar on soil biochemical properties [J]. *J Soil Water Conserv*, 2006, **20**(5): 69 – 72.
- [23] 曾任森. 化感作用研究中的生物测定方法综述[J]. 应用生态学报, 1999, **10**(1): 123 – 126.
- ZENG Rensen. Review on bioassay methods for allelopathy research [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1999, **10**(1): 123 – 126.
- [24] WILLIAMSON G B, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls [J]. *J Chem Ecol*, 1988, **14**(1): 181 – 187.
- [25] 袁倩倩, 李卓坤, 田纪春, 等. 不同水分胁迫下小麦胚芽鞘和胚根长度的QTL分析[J]. 作物学报, 2011, **37**(2): 294 – 301.
- YUAN Qianqian, LI Zhuokun, TIAN Jichun, et al. QTL mapping for coleoptile length and radicle length in wheat under different simulated moisture stresses [J]. *Acta Agron Sin*, 2011, **37**(2): 294 – 301.
- [26] 迟铭, 刘增文. 杜仲叶水提取物对几种农作物的化感作用[J]. 西北农林学报, 2011, **20**(6): 168 – 173.
- CHI Ming, LIU Zengwen. Allelopathy of *Eucommia ulmoides* Oliver leaf aqueous extracts on other crops [J]. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2011, **20**(6): 168 – 173.
- [27] 同兴富, 杜茜, 方苏, 等. 火炬树水浸提液对玉米种子萌发的化感效应[J]. 种子, 2010, **29**(3): 15 – 18.
- YAN Xingfu, DU Qian, FANG Su, et al. Allelopathic effects of water extraction of *Rhus typhina* on *Zea mays* seeds germination [J]. *Seed*, 2010, **29**(3): 15 – 18.
- [28] 万开元, 陈防, 陶勇, 等. 杨树对莴苣的化感作用[J]. 东北林业大学学报, 2009, **37**(1): 21 – 22, 62.
- WAN Kaiyuan, CHEN Fang, TAO Yong, et al. Allelopathy of *Populus* sp. to *Lactuca sativa* [J]. *J Northeast For Univ*, 2009, **37**(1): 21 – 22, 62.
- [29] 赵大君, 郑师章. 无菌凤眼莲根分泌物组分分析[J]. 复旦学报: 自然科学版, 1996, **35**(2): 177 – 182.
- ZHAO Dajun, ZHENG Shizhang. Analysis of root secretes of sterile *Eichhornia crassipes* [J]. *J Fudan Univ Nat Sci*, 1996, **35**(2): 177 – 182.
- [30] 王延平, 王华田. 植物根分泌的化感物质及其在土壤中的环境行为[J]. 土壤通报, 2010, **41**(2): 501 – 507.
- WANG Yanping, WANG Huatian. Allelochemicals from roots exudation and its environment behavior in soil [J]. *Chin J Soil Sci*, 2010, **41**(2): 501 – 507.