

供水及间甲酚对小麦间作蚕豆土壤微生物多样性和酶活性的影响*

柴强 黄高宝** 黄鹏

(甘肃农业大学农业生态工程研究所, 兰州 730070)

【摘要】 通过盆栽试验, 探讨供水(田间持水量45%、60%和75%)和化感物质间甲酚对小麦、蚕豆不同种植模式生长盛期土壤微生物多样性和酶活性的影响。结果表明, 随灌水水平降低, 不同处理的土壤细菌、真菌和放线菌数量均减少, 间甲酚可加剧灌水减少引起的微生物数量减少; 间甲酚对不同处理土壤微生物多样性指数均具有降低作用, 提高灌水水平可缓解间甲酚对间作群体土壤微生物多样性的负效应, 但间甲酚在75%灌水水平下对单作微生物多样性的负效应最大, 45%的供水水平间甲酚作用下间作可维持更高的土壤微生物多样性。间甲酚对土壤过氧化氢酶和脲酶的化感作用不显著, 对脲酶和酸性磷酸酶活性的化感作用显著; 3种土壤酶活性随供水水平降低均显著降低, 但供水与间甲酚、种植模式的互作效应对酶活性影响不显著; 间作对土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性具有极显著影响。

关键词 供水水平 种植模式 土壤微生物多样性 土壤酶活性

文章编号 1001-9332(2006)09-1624-05 中图分类号 Q948.12; S181 文献标识码 A

Effects of water supply and 3-methylphenol on soil microbial diversity and enzyme activity in wheat field intercropped with horse bean. CHAI Qiang, HUANG Gaobao, HUANG Peng (Institute of Agro-ecological Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(9): 1624 ~ 1628.

With pot experiment, this paper studied the effects of water supply levels (45%, 60% and 75% of soil water hold capacity) and allelochemical 3-methylphenol ($300 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ soil}$) on the soil microbial diversity and enzyme activity in mono-cropped and horse bean-intercropped wheat fields during vigorous growth period. The results showed that with the decrease of water supply, the numbers of soil bacteria, fungi and actinomycetes in the two fields decreased significantly, and 3-methylphenol enlarged this negative effect. 3-methylphenol had a negative effect on soil microbial diversity, but the increase of water supply could weaken this effect in intercropped field. The strongest allelopathic effect of 3-methylphenol was observed in mono-cropped field when the water supply was 75% of soil water hold capacity, while intercropping could maintain a relatively stable soil microbial diversity, compared to the mono-cropping with 3-methylphenol and low water supply. The allelopathic effect of 3-methylphenol was not significant on soil catalase activity, but significant on soil urease and phosphatase activities. Water supply level affected soil enzyme activity significantly, the lower the water supply level, the weaker the soil enzyme activity was. The interactions of water supply with 3-methyl phenol or cropping pattern were not significant, but intercropping could significantly affect the activities of soil catalase and phosphatase.

Key words Water supply level, Cropping pattern, Soil microbial diversity, Soil enzyme activity, Allelopathy.

1 引言

土壤微生物和土壤酶是土壤有机质转化的执行者, 又是植物营养元素的活性库^[11, 14], 土壤微生物及其参与下的物质转化是农田生态系统持续发展的基础^[17]. 土壤微生物多样性能敏感地反应生态系统的功能演变及环境胁迫等的影响, 可揭示微生物种类和功能^[9, 10, 16], 其变化与酶活性密切相关^[21]. 土壤生态系统中, 微生物群落多样性和活性受许多环境因素影响, 其中植物所分泌的多种有机化合物是影响不同植物根际环境微生物多样性的一个关键性因素^[3, 7, 15], 这些分泌物产生的化感作用会影响植物分布、群落形成与演化、间作效应

等. 间作套种复合群体内不同作物间通过次生物质产生的化感作用普遍存在, 这些作用抑制或促进着复合群体生态和经济效益的发挥^[13, 20]. 但国内外有关复合群体的化感作用研究, 特别是化感物质作用下复合群体土壤微生物酶活性变化规律的研究十分薄弱, 使生产实践中缺乏通过化感作用途径提高复合群体效益的理论和技 术支撑. 本研究以小麦、蚕豆的单作和间作系统为研究对象, 以前期研究中分离鉴定的小麦根系分泌物间甲酚为参试化感物质,

* 国家自然科学基金项目(30170547)、国家“863”重大节水项目(2002AA2Z4191)和甘肃农业大学创业基金资助项目(GAUCX0502).

** 通讯联系人. E-mail: Huanggb@gsau.edu.cn
2006-03-06 收稿, 2006-06-23 接受.

在不同供水梯度下研究化感物质对间作土壤微生物种群结构及活性的变化,旨在为构建持续高效间作套种模式提供研究方法和理论依据。

2 材料与方法

2.1 供试作物

春小麦 (*Triticum aestivum*) 永良 4 号由甘肃省农业科学院提供; 蚕豆 (*Vicia sativa*) 临蚕 5 号由临夏州农业科学研究所提供。

2.2 试验设计

试验采用盆栽法在甘肃农业大学农业生态工程研究所网室进行。供试土壤为灌淤土,取自兰州植物园,田间持水量为 24.4%。全氮和全磷含量分别为 $1.766 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.732 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $210.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $29.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 8.24。施肥水平为纯 N $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、纯 P_2O_5 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验用盆为高与直径均为 30 cm 的瓦氏盆。供试土壤风干后过 2 mm 筛,播前将土壤与肥料混合均匀,每盆装土 15 kg,浇水至田间持水量的 60%,表土干后播种,播种种子均用 H_2O_2 消毒。单作小麦每盆留主茎苗 40 株,蚕豆保苗 8 株,间作时密度均减半。小麦 3 月 15 日播种,蚕豆 3 月 25 日播种,每处理重复 3 次。蚕豆出苗后,以田间持水量的 45%、60% 和 75% 作为亏缺供水、中等供水和充分供水标准进行水分处理。5 月 10 日参照前期研究中不同浓度间甲酚化感作用研究结果^[4],用浓度为 $300 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤间甲酚进行相关处理。6 月 10 日(小麦开花期)取样测定。

2.3 测定方法

微生物多样性用平板涂抹法测定。其中,细菌用牛肉膏蛋白胨培养基、真菌用马丁丁氏培养基、放线菌用改良高氏一号培养基^[8]。过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法,脲酶用苯酚钠次氯酸钠显色法,酸性磷酸酶用磷酸苯二钠比色法^[24]。微生物多样性指数(DI)采用 Shannon-Wiener 指数法计算,计算公式为:

$$\text{多样性指数} = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

式中, P_i 为第 i 个物种在全部样品中的比例, $P_i = n_i/N$, n_i 为第 i 个物种的个体数, N 为物种总数。

化感效应,用 Williamson 等^[18]的方法计算:

$$RI = 1 - C/T \quad (T \geq C) \quad \text{或} \quad RI = T/C - 1 \quad (T < C)$$

式中, RI 表示化感效应, C 为对照值, T 为处理值。当 $0 < RI < 1$ 时,化感物质具有促进作用,当 $-1 < RI < 0$ 时,化感物质具有抑制作用, RI 绝对值大小与作用强度一致。试验设计及处理代码见表 1。

3 结果与分析

3.1 供水及间甲酚对不同处理土壤微生物种群结构的影响

表 2 为不同处理条件下土壤微生物类群组成。小麦开花期不同处理 3 类土壤微生物类群,细菌是主要

表 1 试验设计及处理代码

Table 1 Experiment design and treatment codes

间甲酚浓度 Concentration of 3-methyl-phenol ($10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil)	0			300 (A)		
供水水平 (% 田间持水量) Water application rates (% of water hold capacity)	75 (I ₁)	60 (I ₂)	45 (I ₃)	75 (I ₁)	60 (I ₂)	45 (I ₃)
单作小麦 Mono cropping wheat	WI ₁	WI ₂	WI ₃	WAI ₁	WAI ₂	WAI ₃
单作蚕豆 Mono cropping faba-bean	BI ₁	BI ₂	BI ₃	BAI ₁	BAI ₂	BAI ₃
小麦间作蚕豆 Wheat faba-bean intercropping	WBI ₁	WBI ₂	WBI ₃	WBAI ₁	WBAI ₂	WBAI ₃

类群,占总数的 6% 以上,其次是真菌,放线菌数量最少。水分对土壤微生物类群影响的基本规律是,随灌水水平的降低,微生物总类群和类微生物类群呈下降趋势。与 WI₁ 相比, WI₂ 和 WI₃ 的微生物总类群、细菌、真菌和放线菌类群分别下降了 25.91%、25.75%、23.89%、41.78% 和 49.68%、49.94%、33.44%、52.29%; 与 BI₁ 相比, BI₂ 和 BI₃ 4 项指标分别下降了 10.62%、9.95%、37.96%、-0.45% 和 42.35%、42.51%、40.18%、42.19%; 与 WBI₁ 相比, WBI₂ 和 WBI₃ 4 项指标分别下降了 28.37%、28.36%、36.42%、11.82% 和 29.37%、28.96%、54.10%、11.62%。间甲酚作用下,土壤微生物类群随供水水平的变化趋势与间甲酚处理相同,与 WAI₁ 相比, WAI₂ 和 WAI₃ 微生物总类群、细菌、真菌、放线菌类群分别下降了 21.80%、21.69%、20.58%、42.44% 和 37.93%、37.91%、36.40%、53.05%; 与 BAI₁ 相比, BAI₂ 和 BAI₃ 4 项指标的变化幅度分别为 -24.30%、-25.16%、29.51%、2.34% 和 -29.91%、-30.62%、12.35%、-2.93%; 与 WBAI₁ 相比, WBAI₂ 和 WBAI₃ 4 项指标增减量分别为 -33.68%、-34.40%、15.43%、-22.43% 和 -41.39%、-41.98%、-5.10%、-18.55%。间甲酚处理中,单作蚕豆在供水水平降低时出现了真菌数量增加现象,在间作 60% 供水水平下也出现了真菌数量增加现象,说明微生物类群变化是水分和化感物质互作的结果。

灌水对土壤微生物多样性指数在不同模式中的影响不同, WI₂、WI₃ 较 WI₁ 的增减幅度分别为 -5.18%、8.56%, BI₂、BI₃ 较 BI₁ 的变化量为 -10.81%、3.96%, WBI₂、WBI₃ 较 WBI₁ 的增减量为 4%、-8.43%, WAI₂、WAI₃ 较 WAI₁ 的变化量为 -5.57%、-4.95%, BAI₂、BAI₃ 较 BAI₁ 分别增加了 44.34%、42.69%, WBAI₂、WBAI₃ 较 WBAI₁ 分别增大了 32.58%、37.87%。这些现象说明,无间甲酚

表2 不同处理的土壤微生物种群结构及多样性指数
Table 2 Soil microbial population and diversity in different treatments

处理 Treatment	微生物量 Soil microbe amount			各微生物所占比例 Percentage(%)				多样性指数 DI
	细菌 Bacteria ($\times 10^6$ CFU dry soil)	真菌 Fungi ($\times 10^4$ CFU dry soil)	放线菌 Actinomytes ($\times 10^4$ CFU dry soil)	总微生物量 Total	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actinomytes	
WI ₁	9.05 a	16.03 b	12.98 a	9.34 a	96.89	1.72	1.39	0.1601 de
WI ₂	6.72 c	12.20 c	7.56 cd	6.92 f	97.14	1.76	1.09	0.1518 e
WI ₃	4.53 d	10.67 d	6.19 d	4.70 d	96.41	2.27	1.32	0.1738 cd
BI ₁	7.74 b	24.79 a	11.1 ab	8.10 b	95.57	3.06	1.37	0.2045 ab
BI ₂	6.97 c	15.38 b	11.15 ab	7.24 c	96.34	2.12	1.54	0.1824 bcd
BI ₃	4.45 d	14.83 bc	6.42 d	4.67 f	95.45	3.18	1.38	0.2126 a
WBI ₁	6.70 c	16.97 b	10.3 b	6.98 d	96.09	2.43	1.48	0.1874 abc
WBI ₂	4.80 d	10.79 d	9.08 bc	5.00 f	96.03	2.16	1.82	0.1949 abc
WBI ₃	4.76 d	7.79 e	9.10 bc	4.93 f	96.57	1.58	1.85	0.1716 cde
WAI ₁	10.79 a	22.64 a	9.14 a	11.10 a	97.14	2.04	0.82	0.1454 ab
WAI ₂	8.45 b	17.98 bc	5.26 cd	8.68 b	97.32	2.07	0.61	0.1373 abc
WAI ₃	6.70 bc	14.40 de	4.29 d	6.89 bc	97.29	2.09	0.62	0.1382 abc
BAI ₁	11.17 a	15.79 cde	6.83 bc	11.40 a	98.02	1.39	0.60	0.1087 c
BAI ₂	8.36 b	20.45 ab	6.99 bc	8.63 b	96.82	2.37	0.81	0.1569 a
BAI ₃	7.75 bc	17.74 bcd	6.63 bc	7.99 b	96.95	2.22	0.83	0.1551 a
WBAI ₁	10.29 a	13.93 e	8.09 ab	10.51 a	97.90	1.33	0.77	0.1191 bc
WBAI ₂	6.75 bc	16.08 cde	6.27 c	6.97 bc	96.79	2.31	0.90	0.1579 a
WBAI ₃	5.97 c	13.22 e	6.59 bc	6.16 c	96.79	2.14	1.07	0.1642 a

不同字母表示差异显著($P < 0.05$) Different letters meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

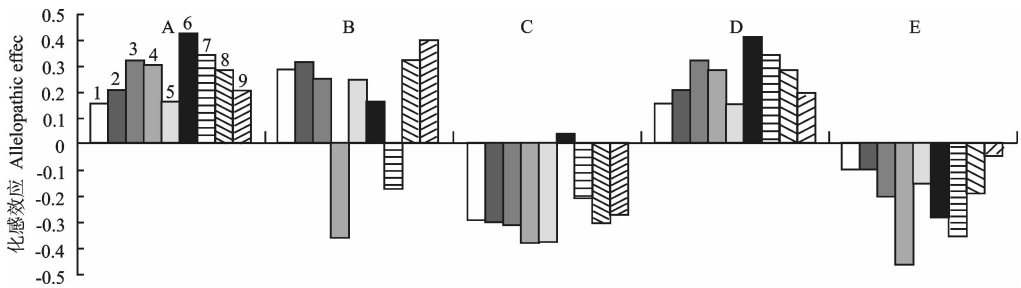


图1 不同供水水平下间甲酚对土壤微生物数量化感效应

Fig.1 Allelopathic effect of 3-methyl-phenol on soil microbial number under different water supply levels.

1) WAI₁; 2) WAI₂; 3) WAI₃; 4) BAI₁; 5) BAI₂; 6) BAI₃; 7) WBAI₁; 8) WBAI₂; 9) WBAI₃. A: 细菌 Bacteria; B: 真菌 Fungi; C: 放线菌 Actinomytes; D: 总微生物量; E: 多样性指数

作用下单作土壤微生物多样性在60%供水情况下较75%供水水平时降低,但供水水平降低到田间持水量的45%时,微生物多样性增大.供水对间作微生物多样性的影响与单作相反,表明单作与间作土壤微生物对水分供应的适应性存在一定差异.间甲酚作用下,单作蚕豆和间作复合群体土壤微生物多样性指数随供水水平降低而增大,但单作小麦均呈下降结果.表明小麦和蚕豆土壤微生物对间甲酚的适应性不同,蚕豆对间作复合群体微生物多样性指数影响相对较大,可作为水分、化感物质、间作互作调控研究的切入点之一.

3.2 不同供水水平下间甲酚对土壤微生物数量化感效应

从图1可以看出,间甲酚对土壤细菌和微生物总数量刺激增加作用,对放线菌呈抑制作用;除75%供水水平下的单作蚕豆和小麦间作蚕豆外,对其它处理真菌均表现为增加作用.间甲酚随供水水

平对不同处理土壤细菌和微生物数量化感作用变化趋势相同,即提高土壤供水水平降低了间甲酚对单作土壤细菌和微生物总数量刺激增加效应,但对复合群体细菌和微生物总数量影响相反.

间甲酚对土壤微生物多样性指数表现为降低作用.单作小麦中,间甲酚对微生物多样性指数的降低作用随供水量的降低而增大;单作蚕豆在75%供水水平下微生物多样性指数降低最大,60%供水水平下的变化最小;小麦间作蚕豆中,随供水水平的降低,间甲酚对微生物多样性指数的化感抑制作用减弱.45%供水水平下,间甲酚对小麦间作蚕豆土壤微生物多样性指数的化感效应分别为单作小麦、单作蚕豆的21.04%和15.93%,即低水分条件下,间作具有保持较高土壤微生物多样性的特点.

3.3 间作与单作土壤微生物种群结构的差异

除无间甲酚45%供水水平处理外,间作微生物总数量随单作降低了5.32%~30.94%,WBAI₁

降低最小, WBI₂ 下降幅度最大; 细菌、真菌数量下降幅度分别为 4.63% ~ 31.13% 和 8.19% ~ 30.94%; 间作土壤微生物多样性指数较单作增大了 0.64% ~ 28.39%. 间作放线菌数量在 45% 供水水平下较单作小麦减少, 但在 60% 和 75% 供水水平下高于单作小麦. 以上结果与果园间作使土壤微生物量增加的结果不一致^[22], 但生物多样性指数增加的结果与许多研究中提到当植被类型增加时土壤微生物多样性增加的结果相一致^[19].

3.4 间甲酚对不同处理土壤酶活性的影响

表 3 为不同处理土壤过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶活性方差分析结果. 间甲酚对土壤过氧化氢酶活性影响不显著, 对脲酶活性具有显著影响, 对酸性磷酸酶活性影响极显著; 间甲酚与水分对 3 种酶活性的互作效应均不显著, 与模式互作对过氧化氢酶和磷酸酶活性效应显著, 但对脲酶活性的互作效应不显著; 间甲酚、水分和种植模式 3 因子互作对 3 种酶活性效应均不显著.

间甲酚对土壤脲酶和酸性磷酸酶均表现为降低作用. 其中, 除 60% 供水水平的单作小麦外, 同模式、同一供水水平相比, 土壤脲酶活性降低了 5.06% ~ 25.7%, 酸性磷酸酶活性降低了 9.03% ~ 33.82%, 45% 供水水平下的单作蚕豆脲酶和酸性磷酸酶活性下降幅度最大.

表 3 不同处理的土壤酶活性
Table 3 Soil enzymes activity in different treatments

处理 Treatment	过氧化氢酶 Soil catalase (ml 0.1 N KMnO ₄ g ⁻¹ soil)	土壤脲酶 Soil urase (mg NH ₃ -N 100 g ⁻¹ soil)	酸性磷酸酶 Soil phosphatase (mg phenol g ⁻¹ soil)
WI ₁	2.01 ab	57.36 ab	37.92 c
WI ₂	1.83 bc	49.22 bc	38.22 c
WI ₃	1.54 cd	40.86 c	27.64 d
BI ₁	2.32 a	60.02 a	56.29 a
BI ₂	1.96 b	48.71 bc	51.32 ab
BI ₃	1.66 bc	43.66 c	44.86 bc
WBI ₁	1.93 b	61.11 a	47.27 b
WBI ₂	1.78 bc	47.33 c	44.27 bc
WBI ₃	1.23 d	42.12 c	37.66 c
WAI ₁	1.93 bc	54.46 a	32.10 b
WAI ₂	1.67 c	50.07 ab	28.82 b
WAI ₃	0.89 e	37.66 c	21.21 c
BAI ₁	2.48 a	55.49 a	46.22 a
BAI ₂	1.97 bc	36.26 c	35.47 b
BAI ₃	1.74 c	32.44 c	29.69 b
WBAI ₁	2.11 b	57.32 a	44.65 a
WBAI ₂	1.77 c	41.46 bc	31.19 b
WBAI ₃	1.33 d	38.62 c	34.26 b

3.5 供水对不同模式土壤酶活性的影响

供水对 3 种土壤酶活性均具有极显著影响, 水分与其它因子的互作效应不显著. 随供水水平降低, 3 种土壤酶活性随之降低. 与 75% 供水处理相比,

无间甲酚 60% 供水处理过氧化氢酶活性降低了 7.77% ~ 15.52%、脲酶活性降低了 14.19% ~ 22.55%、酸性磷酸酶活性降低了 -0.79% ~ 8.83%, 45% 供水处理中 3 种酶活性降低幅度分别为 23.38% ~ 36.27%、27.26% ~ 31.08% 和 20.31% ~ 53.89%、30.85% ~ 41.54%、23.27% ~ 35.76%, 即间甲酚加大了不同水分梯度下土壤酶活性差异.

3.6 种植模式间土壤酶活性差异

种植模式对土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性具有极显著影响, 对脲酶活性的影响不显著. 与无间甲酚相同供水水平处理相比, 单作小麦和蚕豆土壤过氧化氢酶活性高于间作, 但间作酸性磷酸酶活性低于单作蚕豆、高于单作小麦; 间甲酚处理中, 间作过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性低于单作蚕豆、高于单作小麦.

4 讨 论

干旱胁迫可降低土壤微生物群落多样性^[2, 23]. 本研究中随灌溉水平降低, 土壤细菌、真菌和放线菌数量均随之降低, 化感物质作用下土壤微生物量随灌溉水平下降而下降幅度增大, 说明化感物质与水分对微生物量存在互作效应; 供水对土壤微生物多样性的影响在单作和间作群体中不同, 单作蚕豆和单作小麦在无间甲酚 45% 供水水平下的微生物多样性指数最高, 但间作群体在 75% 供水水平下最高.

化感物质对土壤微生物多样性指数均表现为降低作用, 间甲酚对单作小麦土壤微生物多样性的化感作用随供水量的降低而增大, 但单作蚕豆在 75% 供水水平下的微生物多样性指数受化感作用最强; 间作群体中, 增加灌溉水量对间甲酚的化感作用具有明显弱化作用, 说明小麦、蚕豆土壤微生物对间甲酚的适应能力不同. 低水分条件下, 间作具有较高维持土壤微生物多样性的特点, 这一结果与生态系统中植被种类增多或禾本科、豆科作物轮作时作物种类增多而使微生物多样性增加的研究结果一致^[6, 19]. 土壤微生物多样性的降低和土壤特性改变可能会减弱微生物群落对胁迫和扰动抵抗力^[2], 化感作用下作物生产力的降低可能与土壤微生物多样性的变化存在直接关系.

土壤细菌、真菌、放线菌等是土壤关键生物过程

中土壤微生物重要来源^[5],特定土壤微生物细菌和真菌类群密切相关^[1]. 本研究中,间甲酚对土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性化感作用不显著,对脲酶和酸性磷酸酶活性化感作用显著;随供水水平降低3种土壤微生物活性显著下降,但供水与间甲酚、种植模式形成交互作用对酶活性的影响不显著;间作对土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性具有极显著影响. 而间甲酚、供水和种植模式对土壤微生物活性存在显著影响. 可见,影响土壤微生物活性的其它生态因子也将引起酶活性的变化,深入探讨化感物质在单作和间作群体中的作用机理以及微生物种群结构、酶活性与作物生产力的关系,将对构建通过化感作用途径调控复合群体理论和技术产生积极推动作用.

参考文献

- Aon MA, Colaneri AC. 2001. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Appl Soil Ecol*, **18** (3): 255 ~ 270
- Atlas RM. 1984. Use of microbial diversity measurements to assess environmental stress. In: Klug MJ, eds. *Current Perspectives in Microbial Ecology*. Washington DC: American Society for Microbiology 540 ~ 545
- Campbell CD, Grayston SJ, Hirst DJ. 1997. Use of rhizosphere carbon sources in sole carbon source tests to discriminate soil microbial communities. *J Microbiol Methods*, **30** (1): 33 ~ 41
- Chai Q (柴强), Huang G-B (黄高宝), Huang P (黄鹏). 2004. Effect of 3-methyl-phenol and phosphorus application on productivity and components competitive of wheat-broad bean intercropping systems. *Res Agric Modern* (农业现代化研究), **25** (4): 313 ~ 316 (in Chinese)
- Diamantidis G, Effosse A, Potier P, et al. 2000. Purification and characterization of the first bacterial laccase in the rhizospheric bacterium *Azospirillum lipoferum*. *Soil Biol Biochem*, **32** (7): 919 ~ 927
- Dick RP. 1992. A review: Long term effects of agricultural system on soil biochemical and microbial parameters. *Agric Ecosyst Environ*, **40** (1): 25 ~ 36
- Garland JL. 1996. Patterns of potential C source utilization by rhizosphere communities. *Soil Biol Biochem*, **28** (2): 223 ~ 230
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). 1985. *Research Methods of Soil Microbe*. Beijing: Science Press. 40 ~ 59, 263 ~ 269 (in Chinese)
- Jacek K, Jan KE. 2000. Response of the bacterial community to root exudates in soil polluted with heavy metals assessed by molecular and cultural approaches. *Soil Biol Biochem*, **32** (10): 1405 ~ 1417
- Kell JJ, Tate RL. 1998. Effects of heavy metal contamination and remediation on soil microbial communities in the vicinity of a zinc smelter. *J Environ Qual*, **27** (3): 609 ~ 617
- Klemetsson L, Berg P, Clarholm M. 1987. Microbial nitrogen transformation in the root environment of barley. *Soil Biol Biochem*, **19** (3): 551 ~ 558
- Magaurran AE. 1988. *Ecological diversity and its measurement*. New Jersey: Princeton University Press. 47 ~ 132
- Peng S-L (彭少麟), Shao H (邵华). 2001. Research significance and foreground of allelopathy. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **12** (5): 780 ~ 786 (in Chinese)
- Singh JS, Raghubanshi AS, Srivastava SC. 1989. Microbial biomass act as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature*, **338**: 499 ~ 500
- Teng Y (腾应), Huang C-Y (黄昌勇), Long J (龙健); et al. 2003. Functional diversity of microbial community in herbage rhizosphere of reclaimed red soils. *China Environ Sci* (中国环境科学), **23** (3): 295 ~ 299 (in Chinese)
- Tian C-J (田春杰), Chen J-K (陈家宽), Zhong Y (钟扬). 2003. Phylogenetic diversity of microbes and its perspectives in conservation biology. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14** (4): 609 ~ 612 (in Chinese)
- Wardle DA, Yeates GW, Nicholson KS, et al. 1999. Response of soil microbial biomass dynamics, activity and plant litter decomposition to agricultural intensification over a seven-year period. *Soil Biol Biochem*, **31** (12): 1707 ~ 1720
- Williamson GB, Richardson D. 1988. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls. *J Chem Ecol*, **14** (1): 181 ~ 187
- Xiao H-L (肖辉林), Zheng X-J (郑习健); 2001. Effect of diversity on soil microbes. *Soil Environ Sci* (土壤与环境), **3** (3): 238 ~ 241 (in Chinese)
- Yan F (阎飞), Yang Z-M (杨振明), Han L-M (韩静梅). 2001. Allelopathy in sustainable development of agriculture. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **12** (4): 633 ~ 635 (in Chinese)
- Yang W-Q (杨万勤), Wang K-Y (王开运). 2002. Advances on soil enzymology. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), **8** (5): 564 ~ 570 (in Chinese)
- Zhang C-E (张成娥), Du S-N (杜社妮), Bai G-S (白桂松), et al. 2001. Influence of intercropping in the garden on soil microbe and enzymatic activity in highland of Loess Plateau. *Soil Environ Sci* (土壤与环境), **10** (2): 121 ~ 123 (in Chinese)
- Zhong W-H (钟文辉), Cai Z-C (蔡祖聪). 2004. Effect of soil management practices and environmental factors on soil microbial diversity: A review. *Biodivers Sci* (生物多样性), **12** (4): 456 ~ 465 (in Chinese)
- Zhou L-K (周礼恺). 1987. *Soil Enzymology*. Beijing: Science Press. 263 ~ 278 (in Chinese).

作者简介 柴强,男,1972年生,博士,副教授.主要从事多熟种植、植物化感作用和节水农业研究,发表文章30余篇. E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

责任编辑 肖红