

黄土高原旱作小麦化感表达在根际土中的时空异质性研究*

王德胜¹ 马永清^{1,2**} 左胜鹏² 金付平¹ 袁翠萍¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100)

摘要 采用盆栽试验基于统计学方法,对4种不同品种小麦在4个连续生长期根系表层土壤(0~20 cm)化感潜势时空异质性进行了研究。结果表明:不同品种小麦之间根系土壤化感潜势差异极显著($P=0.01$),随生育期变化,化感潜力的变异与品种有关,一般15 cm为普通小麦耕层土壤化感潜力的转折位点。变异函数分析显示,4种小麦根系土壤化感潜势变化是独立、随机、异质性的。/碧玛1号Q/丰产3号Q/宁冬1号Q/小偃22号Q变异函数理论模型分别为线形模型、球型模型、指数模型和高斯模型。其中/小偃22号Q的化感背景值和化感潜力空间结构比随生育期增大,导致0~20 cm表层土壤化感表达具有高度的空间异质性。4种普通小麦的化感表达均存在时空异质性,其中/宁冬1号Q的表层土壤化感表达具有很好的分形特征,其空间分布格局的变异存在尺度依赖。/宁冬1号Q化感潜势在表层土壤的空间分布趋于离散表达,化感潜力的有效纵向半径和有效延深半径分别为5 cm和14 cm。这种时空变异格局可能与根系发育特征、根系翻转运动及土壤环境有关,化感实施过程可能为熵增过程。根系表层土壤化感潜势时空异质性的研究可为监测化感作用实施,定位有效化感物质和合理利用土壤化感潜势提供理论依据,为根系分泌的化感物质可能存在迁移转化的机制奠定基础。

关键词 根际土 普通小麦 化感潜势 空间结构 时空异质 生态管理

中图分类号: S131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2008)03-0537-06

Spatio-temporal heterogeneity of allelopathic expression in rhizosphere soil under different winter wheat cultivars on dryland Loess Plateau

WANG DeSheng¹, MA YongQing^{1,2}, ZUO ShengPeng², JIN FuPing¹, YUAN CuiPing¹

(1. College of Resources and the Environment Northwest A & F University Yangling 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and

Ministry of Water Resources Yangling 712100, China)

Abstract Using pot experiment, spatial and temporal heterogeneity of allelopathic potential of living roots of four common winter wheat cultivars in amended soil of the Loess Plateau of China was investigated for four consecutive growing seasons through bioassay aqueous extraction from the top soil (0~20 cm) in conjunction with typical statistics theory. There is a significant difference ($P=0.01$) in allelopathic expression in rhizosphere soil among different wheat cultivars. With regard to growth and development processes, rhizosphere soil allelopathic variability largely depends on specific wheat cultivars. Interestingly though, 15 cm soil depth determines increase or decrease in key loci allelopathic trait. Based on normal distribution traits of allelopathic index, variability functions of the four wheat cultivars show that allelopathic expression in rhizosphere soil are independent, stochastic and heterogeneous. Through mathematical modeling, it is concluded that the four wheat cultivars display four various functions: /Bima No. 10 for linear model /Fengchan No. 30 for spherical model /Ningdong No. 10 for exponential model and /Xiaoyan No. 220 for Gauss model. Specifically, allelopathic background and spatial distribution are enhanced with regard to Xiaoyan No. 220 during development, which exhibits obvious spatial heterogeneity in the top soil (0~20 cm). Among the spatial and temporal heterogeneity of the four wheat cultivars, allelopathic dynamics of rhizosphere soil in /Ningdong No. 10 exhibits significant topological trait adhering to scale factor. Allelopathic expression indicates that /Ningdong No. 10 displays an enriched scatter of fine roots with efficient radii (with average transverse radius of 5 cm and longitudinal radius of 14 cm). From the present study, it is de-

*国家/十一五0科技支撑计划课题(2006BAD09B08)和西北农林科技大学创新团队(首席科学家邵明安)资助

**通讯作者, E-mail: mayongqing@ms.isvc.ac.cn

王德胜(1979-),男,在读硕士研究生,主要从事作物化感作用研究。E-mail: victor7986@163.com

收稿日期:2007-08-07 接受日期:2007-10-28

duced and hypothesized that spatial and temporal heterogeneity of allelopathic expression of wheat rhizosphere soil is possibly related to root growth conformation, turnover/movement and surrounding soil conditions. In fact allelopathic expression leads to entropy enrichment. The study provides the theoretical base for monitoring the fate of allelochemicals and the utilization of allelopathic potential in rhizosphere soils. Meanwhile, it also confirms the popular theory of shifting and transformation of root exudates, including allelochemicals with allelopathic evidence.

Key words: Rhizosphere soil; *Triticum aestivum* L.; Allelopathic potential; Spatial structure; Spatial and temporal heterogeneity; Ecological management

(Received Aug. 7, 2007; accepted Oct. 28, 2007)

植物化感性状反映了植物对自身生长环境的响应和适应对策^[1]。将环境、植物个体和生态系统结构、过程与功能统一起来考虑,发现植物在漫长的进化和发展过程中,与环境相互作用,逐渐形成了许多内在生理和外形态方面的适应对策,以最大程度地减小环境的不利影响^[2]。如植物在生长期不断地通过根系释放分泌物影响其周围生物生长与发育,从而达到抵御侵害,维持有益的共生关系,改变土壤理化性质及增强比较竞争优势的目的^[3]。根分泌物化感作用的研究已成为土壤生态学领域的热点与前沿课题。作为根系最重要的特性之一,根释放分泌物中的化感物质是植物与其他生物进行化学防御与通讯的信息物质,具有多种功能,如除草、杀虫、改良土壤并抑制土壤硝化作用、固氮、增强氮肥有效性等^[4]。如果将根分泌的化感物质的有效成分鉴定分离出来,可以作为生物源农药,如杀虫剂、除草剂或杀菌剂等^[5]。

根际土壤(Rhizospheric soil)是根分泌物及其转化分解产物的储存库,根分泌释放的化感物质直接进入根际土壤。根分泌物主要有 3 大类:一些大分子有机物,包括糖、蛋白质、酶和凝胶等;另一类为小分子酸、酚和酮等;第三类为生长激素、黄酮和甾类等^[6]。由普通小麦根分泌或残茬分解产生到土壤中的化感物质一般为酚类物质和丁布(DMBOA)及其衍生物等,它们在特定的土壤环境中经历了不同类型的滞留、迁移和生物降解,产生一些中间产物如 MBOA、BOA、HMBOA、HBOA、AAMPO、AMPO 以及 APO 等^[7,8],从而化感作用也发生动态变化。由于土壤的非生物(物理化学)和生物(微生物)因素对引起化感作用物质的种类和浓度阈值产生影响,以至于限制了化感作用的产生。对根分泌化感物质中酚类化合物的研究表明,土壤质地不同,水溶性酚的含量有所不同^[9]。小麦中的异羟肟酸在根分泌物中以多糖甙配基(Aglucoses)的形式出现,而在根提取物中则以单葡萄糖甙(Glucoses)的形式存在,表明异羟肟酸在从根部释放之前发生了一定转化^[10]。当然,不同物种或基因型的根系分泌物以及根际土壤中的化感物质也显著不同^[11]。

Hand 等报道小麦根系土壤渗出物对多年生黑麦草有毒性作用,可能是土壤化感物质参与了抑制作用^[12]。Wu 等报道小麦活体植株的化感作用受主基因控制,并且表现为数量遗传性状,目前已在小麦的 2B 染色体上找到了与对一年生黑麦草的化感作用和化感物质相关的数量遗传位点(QTLs),因而鉴定其化感基因而培育出含高浓度化感物质的小麦品种是可能的^[13]。目前对作物在土壤中化感作用表达的研究多集中在植物残体(Residues)特别是秸秆分解所产生的化感物质向土壤中的释放等方面^[14-16],而对活体植株根分泌的化感物质在土壤中由于滞留、迁移、转化过程化感表达的时空异质性研究较少。本研究采用盆栽试验,在 4 个典型的小麦化感品种的苗期、返青期、拔节期和分蘖期采集不同层次的根际土,以茬作物玉米为测试品种,研究黄土高原旱作小麦耕层土化感潜力的动态表达,以明确化感潜力在土壤中的表现规律,为合理利用作物化感潜力进行杂草控制,减缓自毒效应和对下茬作物的影响等提供理论借鉴。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验

试验在中国科学院水土保持研究所内进行,共筛选了 4 个典型化感普通小麦品种,分别为/碧玛 1 号 Q/丰产 3 号 Q/宁冬 1 号 Q/小偃 22 号 Q。取试验地前茬作物为小麦的 0~20 cm 耕层熟土,暴晒,作为盆栽用土。先将土拍碎,过 100 目筛后充分混匀,装入高 50 cm,半径 12 cm 的桶中。装桶时先在桶中装入约 1.5 kg 卵石,卵石堆放在桶一侧,将塑料管紧贴桶壁插入卵石中,卵石上方用塑料纱网覆盖。桶中装入上述干土 11.0 kg 装土时边装边压实。播前先浇水,浇水时将水从塑料管中灌入。按照 0.25 g/kg⁻¹(土)的标准将尿素溶于水中随水施用。2006 年 10 月 5 日播种小麦,播种时先将种子用流动水浸种催芽 24 h,每个小麦品种播于 10 个单桶(重复)中,每桶播种 15 粒种子,播完表层覆土 0.59 kg 待出苗后统一定苗 10 株/桶⁻¹。人工浇水维持自然生长。

1.2 根系土壤水提液制备

待小麦生长稳定后,分别在 2006 年 11 月 5 日

(苗期)、2007年 2月 6日(返青期)、3月 7日(拔节期)和 4月 11日(分蘖期)采集小麦根际土,分为 0~ 5 cm、5~ 10 cm、10~ 15 cm及 15~ 20 cm 4个土壤空间层次,每品种 6个重复。将同一处理土壤样品混匀,自然晾干,粉碎,再用 1B20(MBV)水浸提,得到的水提取液冷藏备用。

1.3 化感生物测定

依据 Leather^[17]和 Zuo^[18]培养皿滤纸法,以玉米种子为测试受体,以根生长为指标(幼苗根数、最大根长和总根长)进行化感评价。然后根据 W i l l i a m s o n 的化感作用评价方法^[19],用处理与相应对照的 T/C 作为衡量指标,得出化感作用效应指数 RI。RI = T/C - 1。其中 C 是对照值, T 是处理值。当 RI > 0 时,表示化感作用对生长有促进作用; RI < 0 时,表示抑制作用。RI 的绝对值代表化感作用强度的大小。

1.4 数据处理

采用 Excel2000、SPSS12.0 以及 ARCVIEW 9.1 进行数据处理、分析以及作图。

2 结果与分析

2.1 不同小麦品种根际土化感动态

4种普通小麦品种根际土化感表达动态显著不同(P = 0.01), /碧玛 1号 0根际土的化感潜势随生育期呈连续表达,而 /丰产 3号 0、/宁冬 1号 0和 /小偃 22号 0为化感非连续表达。化感潜势时间序列基本稳定。/碧玛 1号 0(图 1a)苗期化感潜力较强,到拔节期和分蘖期根系土壤化感潜力逐渐下降,只是返青期在 10~ 15 cm 处化感潜力表达为连续性的,可能是苗期根系大量释放化感物质累积效应所致。化感潜力沿土壤剖面的分布分析表明,苗期、拔节期和分蘖期化感潜势空间分布趋势基本一致,为随深度先增(0~ 10 cm)后减(10~ 15 cm)再增(15~ 20 cm)型,而返青期刚好相反,为先减后增再减型。/丰产 3号 0(图 1b)与 /碧玛 1号 0化感潜势时空动态不同,分为两种类型,苗期、拔节期和分蘖期为随深度先增(0~ 15 cm)后减(15~ 20 cm)型,而返青期为先增(0~ 10 cm)后减(10~ 15 cm)再增(15~ 20 cm)型,但总体化感潜力变化在 0.2~ 0.3 间。而 /宁冬 1号 0(图 1c)根系土壤化感潜力集中在 0.1~ 0.2 内。返青期和分蘖期化感潜力随深度基本稳定(0.16);苗期根系土壤化感潜势为先减(0~ 15 cm)后增(15~ 20 cm)型;而拔节期在 0~

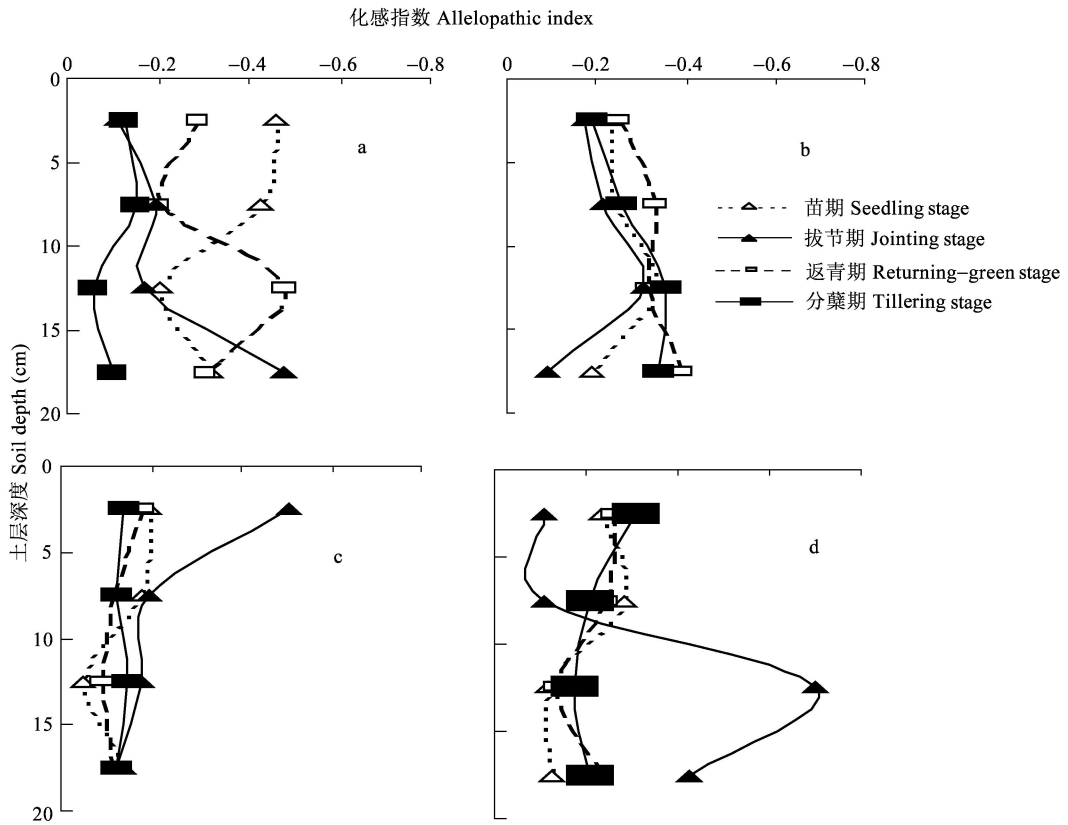


图 1 /碧玛 1号 0(a)、/丰产 3号 0(b)、/宁冬 1号 0(c)和 /小偃 22号 0(d)小麦根际土水提取液化感表达动态

Fig 1 Dynamics of allelopathic expression of water extracts of rhizosphere soil of winter wheat

/Bima No 10 (a), /Fengchan No 30 (b), /Ningdong No 10 (c) and /Xiaoyan No 220 (d)

5 cm 化感潜力突然下降, 5~20 cm 化感潜力下降趋势变缓。/小偃 22 号 0 (图 1d) 在拔节期也存在一个化感潜力跃变空间, 0~10 cm 渐减, 10~15 cm 递增, 15~20 cm 递减; 但与拔节期不同的是, 苗期、返青期和分蘖期先渐增递减再递增, 但化感潜力处在 0.1~0.3 内。

2.2 不同小麦品种根际土化感变异函数

基于化感指数为正态分布原则分别计算了 4 种普通小麦的变异函数 (图 2)。从图 2 可看出, 4 种普通小麦根系土壤化感潜势变化是独立的、随机的和异质性的。/碧玛 1 号 0 /丰产 3 号 0 /宁冬 1 号 0 /小偃 22 号 0 变异函数理论模型分别为线形模型、球型模型、指数模型以及高斯模型。

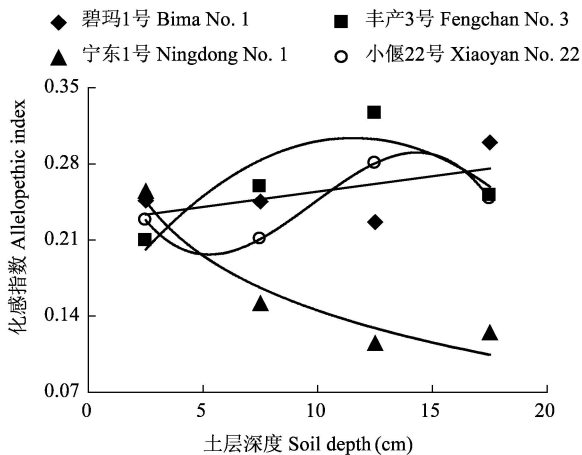


图 2 不同品种小麦根际土化感表达变异函数图

Fig 2 Variation functions of allelopathic expression of rhizosphere soil of different winter wheat cultivars

/碧玛 1 号 0 线形变异函数表明, 在 0~20 cm 化感潜力基本表现为线形效应, 变化为 24%, 说明土壤化感潜力空间相关性很弱, 表现出明显的空间一致性; 表层 (0~5 cm) 到深层 (15~20 cm) 土壤化感潜势的本底值分别为 0.25 和 0.30 说明土壤化感指数值的变化幅度不大, 但深层土壤较表层土壤的化感潜力强, 这是因为表层土壤更易受各种随机因素的影响。/丰产 3 号 0 球型变异函数表明, 表层和深层化感潜力变异为 46%, 呈中等空间相关性, 化感极点分别为 0.21 和 0.32 说明化感潜力的空间变异较大; 亚表层土壤化感潜势同样大于表层土壤, 可能土壤因受施肥等管理措施影响导致表层化感潜力的变异。/宁冬 1 号 0 指数形变异函数与 /碧玛 1 号 0 和 /丰产 3 号 0 不同, 化感本底值分别为 0.26 和 0.10 表现为较高的空间变异相关性 (16%), 说明土壤化感潜力存在一定的空间相关性, 但土壤环境变异向随机变化方向发展, 导致随深度增大化感

潜力持续指数下降。而 /小偃 22 号 0 随生育期的化感背景值变化范围为 0.16~0.35 0~25 cm 为 1 个高斯跃变空间周期, 化感潜力空间结构比增大, 导致 0~20 cm 表层土壤化感表达具有高度的空间异质性, 这表明土壤化感表达表现为明显的周期规律变化, 存在明显的空间高度自相关。

2.3 不同小麦品种根际土化感潜势时空异质性

化感潜势异质性是指化感属性的变异程度, 不仅体现了化感性状的空间结构变化 (空间异质性), 而且体现在化感性状的时间动态变化 (时间异质性)。通过以小麦根系为中心, 根系横向半径为横坐标 (X), 纵向半径为纵坐标 (Y), 得到 4 个品种小麦根际土化感表达时空变异图 (图 3)。从图 3 可看出等化感潜力点连接起来可看成是一个化感潜力等值斑块, 此受土壤环境的调控。以时间序列为主线, 分析化感潜势的空间异质性发现 4 个品种均存在 3 个类似组分: 空间组成 (化感单元的类型、数量和面积比例)、空间构型 (化感位点的空间分布、斑块形状、斑块大小、位点连接度、斑块连通性) 以及空间相关性 (化感单元空间关联程度、位点的关联程度、化感指数梯度和趋势度)^[20]。从 /碧玛 1 号 0 到 /小偃 22 号 0, 高化感指数值位点逐渐增多, 位点连成的斑块逐渐规则化。4 种普通小麦的化感边缘效应与边缘作用基本一致, 主要反映了生长初期和最表层的化感背景几乎相同, 只是品系与环境互作显著, 根系与土壤生物关系复杂, 干扰参与, 体现出有利于化感潜势的诱导产生。/宁冬 1 号 0 根系土壤化感时空动态与其他 3 品种表层土壤化感时空异质性差异均达显著水平, 说明 /宁冬 1 号 0 的表层土壤化感表达具有很好的分形特征, 其空间分布格局的变异存在尺度依赖, 根系有效横向半径和有效纵深半径分别为 5 cm 和 14 cm。

3 讨论

3.1 小麦根系与根际土化感表达

本研究中 4 种普通小麦的化感潜力均较低, 表明根系分泌微量的物质进入土壤, 当遇到适宜微生物, 将发生降解转化以及吸附固定^[21]。Etterodt 通过同位素示踪技术发现 MBOA 和 DMBOA 在土壤中被降解为 AMPO 和 AAMPO^[22]。活体植株的生育期对根系反应机制也很明显。化感水稻品种 /PB127770 当无芒稗存在时比对照多分泌 3 倍的化感物质, 可能机制是该品种根系能响应伴生杂草产生的化感物质, 从而急剧增强化感分泌物, 通过土壤质流运动抑制杂草生长^[23]。本研究发现, 同一品种不同生育期土壤化感潜力也不一致, 表明不同时期根系活力不同, 从而影响化感物质的分泌能力。

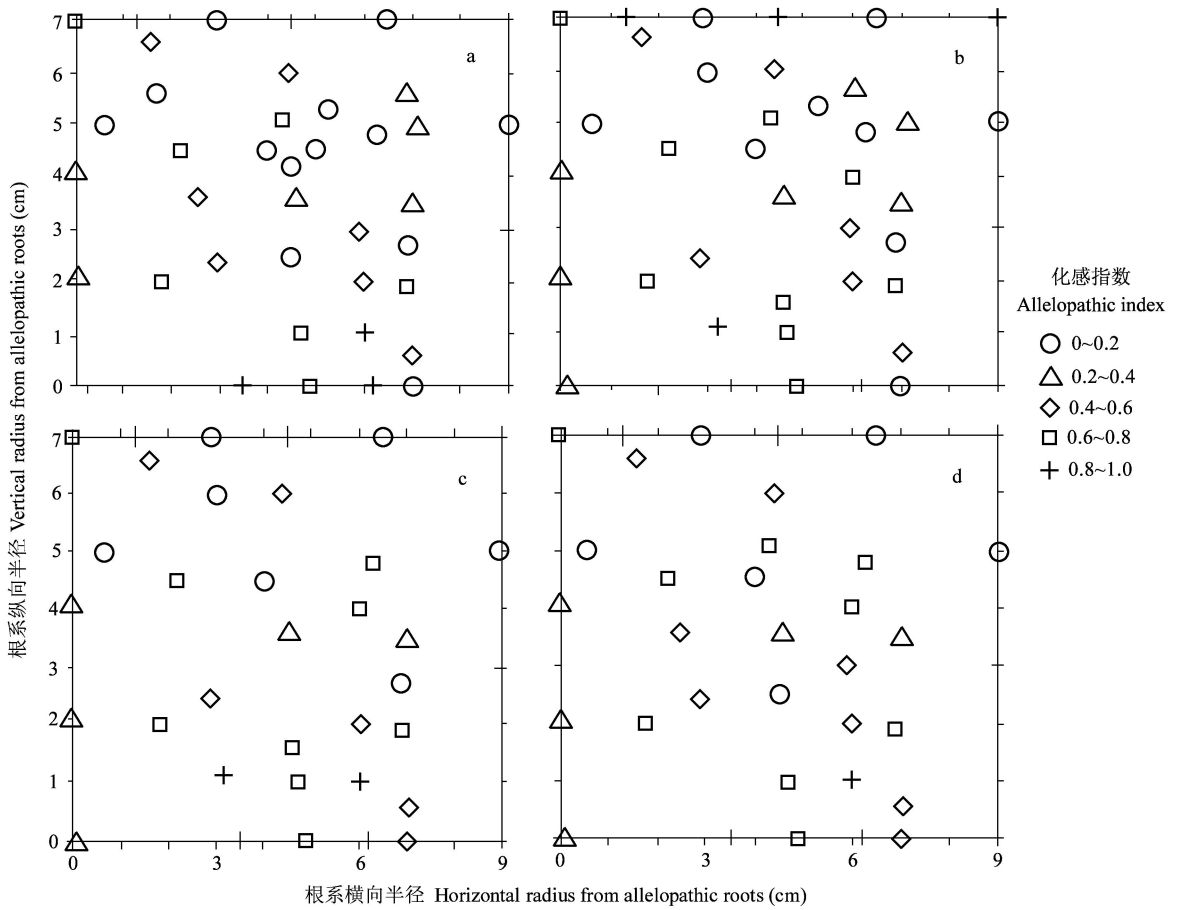


图 3 /碧玛 1号0 (a)、/丰产 3号0 (b)、/宁冬 1号0 (c)和/小偃 22号0 (d)小麦根际土化感表达时空变异
 Fig 3 Temporal and spatial variations of allelopathic expression of rhizosphere soil of winter wheat
 /Bima No 10 (a), /Fengchan No 30 (b), /Ningdong No 10 (c) and/ Xiaoyan No 220 (d)

诚然,不同品系小麦根系的地下性状表现也有区别,如比根长、细根直径、细根比例、比根面积、根深分布、99%根深以及根系养分吸收策略等^[24]。/小偃 22号0的主根系发达,细根比例大,水分利用率高,其根系土壤化感潜势较强。根据土壤水分营养特征,植物根毛分化发生发育一般有位置决定模式和反馈侧向抑制两种方式,最终导致根系翻转运动,从而影响根系土壤化感潜力的空间表达。

3.2 小麦化感表达的时空格局与土壤环境异质性
 本研究发现土壤化感潜力层次效应明显,15 cm为化感潜力转变层,说明0~15 cm为人类活动或全球变化直接影响层,如CO₂浓度增大、温度升高和降雨增多等^[25]。/碧玛 1号0、/丰产 3号0、/宁冬 1号0和/小偃 22号0的变异函数理论模型分别为线形模型、球型模型、指数模型和高斯模型。表明/碧玛 1号0根系土壤化感潜势随耕层深度逐渐增加; /宁冬 1号0刚好相反,随土壤加深呈指数型下降; /丰产 3号0总体表现为球型方式,随土壤

层次呈先增后减模式; /小偃 22号0为周期变化的高斯方式,存在波峰和波谷化感潜力。这些反映了土壤不同指标与土壤化感潜势的联系。表层土壤各项土壤质量指标的空间变异强于亚表层土壤,且表层土壤黏粒含量空间变异随根系(化感源)距离增加而增加,因而化感潜力的时空格局与土壤环境异质性有关^[26]。在理解作物胁迫化感应答机制的基础上,构建具有胁迫抵抗和适应功能的工程细胞,并用于重要作物的功能育种和生物基化学品的生产,是今后必须加强的研究方向。

参考文献

[1] McIntyre S, Lavorel S, Landsberg J, et al Disturbance response in vegetation towards a global perspective on functional traits[J]. Journal of Vegetation Science 1999, 10: 621- 630
 [2] Cornelissen J H. C., Lavorel S, Gamier E, et al A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide[J]. Australian Journal of Botany 2003, 51: 335- 380

- [3] Inderjit J. W. Plant allelochemicals interference or soil chemical ecology[J]. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematic* 2001, 4(1): 3- 12
- [4] Bertin C., Yang X., Weston L. A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere[J]. *Plant and Soil* 2003, 256: 67- 83
- [5] Anaya A. L. Allelopathy as a tool in the management of biological resources in agroecosystems[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences* 1999, 18: 697- 739
- [6] Seal A. N., Pratley J. E., Haig T., et al. Identification and quantitation of compounds in a series of allelopathic and nonallelopathic rice root exudates[J]. *Journal of Chemical Ecology* 2004, 30(8): 1647- 1662
- [7] Macías F. A., Oliveros-Bastidas A., Marin D., et al. Degradation studies on benzoxazinoids. Soil degradation dynamics of 2, 4-dihydroxy-2-methoxy-2(1H)-2H-1, 4-benzoxazin-2(1H)-one (DMBOA) and its degradation products: phytotoxic allelochemicals from Gramineae [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2004, 52(21): 6402- 6413
- [8] Understrup A. G., Ravnskov S., Hansen H. C. B., et al. Biotransformation of 2-benzoxazolinone to 2-amino-2(3H)-phenoxazin-3-one and 2-acetylamino-2(3H)-phenoxazin-3-one in soil[J]. *Journal of Chemical Ecology* 2005, 31(5): 1205- 1222
- [9] Huang P. M., Wang M. C., Wang M. K. Catalytic transformation of phenolic compounds in the soil[M] // Inderjit Dakshini K. M. M., Foy C. L. *Principles and Practices in Plant Ecology: Allelochemical Interactions*. Boca Raton: CRC Press, 1999: 287- 306
- [10] Kruse M., Strandberg M., Strandberg B. Ecological Effects of Allelopathic Plants: A Review [R]. NERI Technical Report No. 315. Silkeborg Bogtryk, Denmark. Ministry of Environment and Energy. National Environmental Research Institute, 2000: 27- 29
- [11] Bertin C., Yang X. H., Weston L. A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere [J]. *Plant and Soil* 2003, 256(1): 67- 83
- [12] Handi B., Inderjit Olofsdotter M., et al. Laboratory bioassay for phytotoxicity: an example from wheat straw [J]. *Agronomy Journal* 2001, 93(1): 43- 48
- [13] Wu H., Pratley J., Ma W., et al. Quantitative trait loci and molecular markers associated with wheat allelopathy [J]. *Theoretical and Applied Genetics* 2003, 107(8): 1477- 1481
- [14] Batish D. R., Singh H. P., Pandhet J. K., et al. Allelopathic interference of *Parthenium hysterophorus* residues in soil[J]. *Allelopathy Journal* 2005, 15(2): 267- 274
- [15] Kulvinder K., Kapoor K. K., Kaur K. Effect of incorporation of sunflower residues in soil on germination of mungbean and pearl millet[J]. *Environment and Ecology* 1999, 17(3): 693- 695
- [16] Nakano H., Morita S., Shigemori H., et al. Plant growth inhibitory compounds from aqueous leachate of wheat straw[J]. *Plant Growth Regulation* 2006, 48(3): 215- 219
- [17] Leather G. R., Einhellig F. A. Bioassays in the study of allelopathy[M] // Putman A. R., Tang C. S. *The Science of Allelopathy*. New York: John Wiley & Sons, 1986: 133- 145
- [18] Zuo S. P., Ma Y. Q., Deng X. P., et al. Allelopathy in wheat genotypes during the germination and seedling stages[J]. *Allelopathy Journal* 2005, 15(1): 21- 30
- [19] Williamson G. B., Richardson D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls[J]. *Journal of Chemistry Ecology* 1988, 14(1): 181- 187
- [20] Lindborg R., Eriksson O. Historical landscape connectivity affects present plant species diversity[J]. *Ecology* 2004, 85(7): 1840- 1845
- [21] Tharayil N., Bhowmik P. C., Xing B. S. Preferential sorption of phenolic phytotoxins to soil: Implications for altering the availability of allelochemicals[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2006, 54(8): 3033- 3040
- [22] E tzerodt T., Susan T., Anne G., et al. Elucidating the transformation pattern of the cereal allelochemical 6-methylthio-2-benzoxazolinone (MBOA) and the trideuterio-6-methylthio analog [D23]MBOA in soil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2006, 54(4): 1075- 1085
- [23] Kong C. H., Li H. B., Hu F., et al. Allelochemicals released by rice roots and residues in soil[J]. *Plant and Soil* 2006, 288(1/2): 47- 56
- [24] Katsuchiro K. Factors affecting phytotoxic activity of allelochemicals in soil[J]. *Weed Biology and Management* 2004, 4(1): 1- 7
- [25] Walker B., Steffen W. An overview of the implications of global change for natural and managed terrestrial ecosystems[EB/OL]. *Conservation Ecology* <http://www.consecolg/journal/voll/iss2/art2/index.html> 1997
- [26] Bestelmeyer B. T., Ward J. P., Havstad K. M. Soil geomorphic heterogeneity governs patchy vegetation dynamics at an arid ecotone[J]. *Ecology* 2006, 87(4): 963- 973