

# 污染物对无脊椎动物乙酰胆碱酯酶活性的影响研究进展

刘文秀, 郭鹤飞, 王兰, 王茜\* (山西大学生命科学学院, 山西太原 030006)

**摘要** 从无脊椎动物的角度, 综述了乙酰胆碱酯酶的特性及其在国内外的研究进展, 并对该领域研究前景进行了展望, 旨在为环境监测、农药残留及疾病治疗等方面提供科学依据。

**关键词** 无脊椎动物; 乙酰胆碱酯酶; 污染物

**中图分类号** S859.82 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)02-0004-04

## Research Progress on the Effects of Pollutants on Acetylcholinesterase Activity in Invertebrates

LIU Wen-xiu, GUO Hu-fei, WANG Lan et al (College of Life Sciences, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006)

**Abstract** We summarized the characteristics of acetylcholinesterase and its research progress at home and abroad from the perspective of invertebrates. The research foreground of this field was prospected, so as to provide scientific basis for environmental monitoring, pesticide residue, disease treatment and so on.

**Key words** Invertebrates; Acetylcholinesterase; Contaminants

随着工农业生产的发展, 各种废水大量排放, 再加上化学农药的不合理使用, 使得环境污染问题日益严重, 对生态环境及人类安全造成一定影响, 引起了世界各国的普遍关注。大多数无脊椎动物个体小, 生活自由, 容易受环境影响, 适宜研究生态毒理作用, 并被作为潜在环境污染的筛选工具<sup>[1]</sup>。其中, 枝角类作为指示生物检测 400 多种化学物的毒性<sup>[2]</sup>。

乙酰胆碱酯酶 (Acetylcholinesterase, AChE) 是生物神经传导中的一种关键性酶, 在胆碱能突触间, 该酶能降解乙酰胆碱 (ACh), 终止神经递质对突触后膜的兴奋作用, 保证神经信号在生物体内的正常传递。大多数污染物是 AChE 的抑制剂, 进入环境后, 影响生物机体 AChE 的活性, 造成大量动物的死亡。为了避免这种现象的发生, 国内外学者就不同污染物对动物 AChE 的毒理学机制进行了研究。笔者从无脊椎动物的角度, 综述了 AChE 的特性以及作为神经传导的标志物在该领域的研究进展, 旨在为生态环境监测、农药残留及疾病治疗等提供科学依据。

### 1 乙酰胆碱酯酶的性质

**1.1 蛋白质结构和基因结构** 从蛋白结构来看, AChE 最突出的特征就是有一个深而窄的狭口, 活性基团位于此狭口中, 而活性中心主要由以下 3 个部分组成 (图 1): ①酯解部位, 主要由丝氨酸和组氨酸组成, 可以与乙酰胆碱的羧基碳原子结合; ②季铵基团结合部位, ACh 含季铵阳离子部分, 与 AChE 活性中心上的阴离子部位结合; ③疏水性区域, 该区域有色氨酸或酪氨酸等芳香族氨基酸, 与酯解或季铵基团结合部位连接或在其附近, 在与芳香族底物结合中起重要作用<sup>[3]</sup>。

从基因结构来看, 自 1986 年黑腹果蝇 (*Drosophila melanogaster*) 的第 1 个 AChE 基因被克隆以来, 生物体内的 AChE

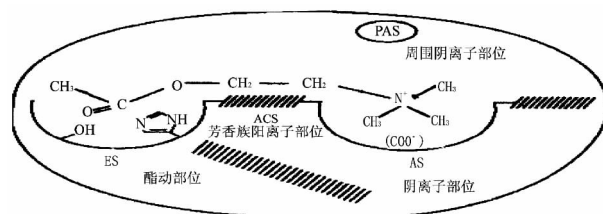


图 1 乙酰胆碱酯酶的活性部位示意<sup>[4]</sup>

### Fig. 1 Schematic diagram of active sites of acetylcholinesterase

催化亚基的 cDNA 逐步被发现, 这些 cDNA 均编码 1 个长度 535 个氨基酸左右的多肽链。绝大部分生物的 AChE 由单个 *Ace* 基因编码, 但线虫基因组中有 4 种 *Ace* 基因 (*Ace-1*、*Ace-2*、*Ace-3*、*Ace-4*), 棉蚜 (*Aphis gossypii*)、桃蚜 (*Myzus persicae*)、冈比亚按蚊 (*Anopheles gambiae*) 和三带喙库蚊 (*Culex tritaeniorhynchus*) 4 种昆虫中发现 2 种 *Ace* 基因 (*Ace-1*、*Ace-2*)<sup>[5]</sup>。不同生物间 *Ace* 的碱基长度、内含子、外显子数目不同, 结构就不同, 所以它们编码的 AChE 对抑制剂的敏感性也不同。

根据 NCBI 数据库中得到不同物种 AChE 的基因序列, 利用 MEGA 5.1 软件构建了系统发育树 (图 2), 显示了不同物种间 AChE 基因的亲缘关系: 大型蚤 *Daphnia magna* (AB697764.1)、玻璃海鞘 *Ciona intestinalis* (NM\_001128877.1)、斑马鱼 *Danio rerio* (NM\_131846.2)、家蝇 *Musca domestica* (AF533335.1)、鲤鱼 *Cyprinus carpio* (AB361595.1)、河鲀 *Tetraodon nigroviridis* (AY733039.1)、橄榄星室木虱 *Pseudophacopteron canarium* (DQ425058.1)、根结线虫 *Meloidogyne javanica* (AF080184.1)、马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* (GU066339.1)、巴氏白蛉 *Phlebotomus papatasi* (JQ922267.1)、药材甲 *Stegobium paniceum* (GU944767.1)、盲鳗 *Myxine glutinosa* (U55003.1)、催命按蚊 *Anopheles funestus* (JN815138.1)、厩螫蝇 *Stomoxys calcitrans* (HM125963.1)、拟黑多刺蚁 *Polyrhachis vicina* (JF742990.1)、螺旋蝇 *Cochliomyia hominivorax* (FJ8-30868.1)、埃及血吸虫 *Schistosoma haematobium* (AY228511.1)、南方根瘤线虫 *Meloidogyne incognita* (AF075718.1)、烟草甲 *Lasioderma*

**基金项目** 山西省特色重点学科项目 (2011-SXDX-SWX-003)。  
**作者简介** 刘文秀 (1991—), 女, 山西文水人, 硕士研究生, 研究方向: 动物毒理学。\* 通讯作者, 讲师, 博士, 硕士生导师, 从事动物毒理学研究。  
**收稿日期** 2017-10-28

*serricorne* (GU211888.1)、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (FN538987.1)、褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (FM866396.2)。研究发现,家蝇、厩螫蝇和螺旋蝇三者间的亲缘关系较近,根结线虫和南方根瘤线虫的 *AChE* 基因也比较相似,而按蚊与其

他物种的 *AChE* 基因的亲缘关系相对较远。这些物种间 *AChE* 基因亲缘关系的远近可能就是由于其编码基因的不同所造成的。

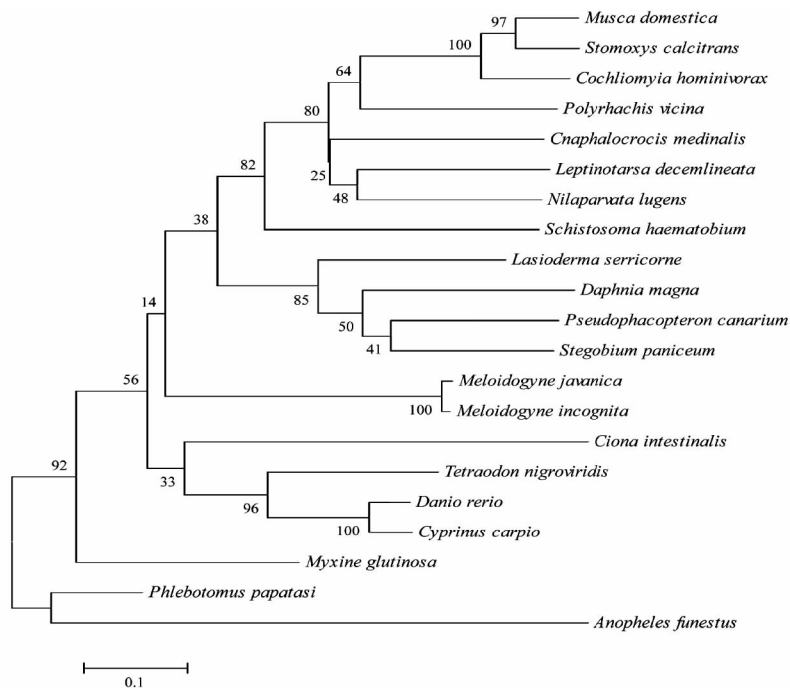


图2 几种动物 *AChE* 基因序列进化树

Fig.2 Phylogenetic tree of *AChE* gene in several kinds of animals

**1.2 乙酰胆碱酯酶的生物学功能** *AChE* 是生物体内反应速度最快的酶之一 ( $K_{cat} = 1.6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ), 是丝氨酸水解酶最重要的家族成员之一, 在脊椎动物和无脊椎动物体内都有分布, 是生物神经传导中的一种关键性的酶, 调节 *ACh* 转换, 负责终止跨突触的许多神经元细胞信息的传递。 *AChE* 是一种多分子型的复杂蛋白质, 在中枢及外周神经系统与 *ACh* 受体一起完成神经之间动作电位的传递, 从而保证神经信号在生物体内的正常传递<sup>[6]</sup>。

在生态毒理学中, *AChE* 被认为是神经系统中胆碱能信号传导的最重要的生物标志物, 因此 *AChE* 活性检测被广泛应用于研究中, 酶抑制是化学诱导的神经毒性的征兆<sup>[7]</sup>。在环境监测中, 无脊椎动物的 *AChE* 常被作为指示剂, 监测环境中污染物的含量。 *AChE* 可能与细胞的发育和成熟有关, 此外, 有研究发现利用不同方式诱导细胞凋亡, 均检测到 *AChE* 的表达, 且 *AChE* 的反义核酸可以部分抑制细胞凋亡, 说明 *AChE* 对细胞凋亡有一定的影响<sup>[8]</sup>。医学研究发现, *AChE* 促进释放 *ACh* 时, 致使迷走神经兴奋, 表现为心率减慢、血管扩张、消化道平滑肌收缩、消化腺分泌增加等, 从而引起胃肠蠕动。杨筱珍等<sup>[9]</sup> 研究发现, 通过肠道铺片和组化染色的方法发现在中华绒螯蟹后肠中广泛存在 *AChE*, 促进肠道的排泄, 肠胃蠕动加剧, 使机体摄食率增加。

**1.3 乙酰胆碱酯酶的分布情况** 在不同无脊椎动物体内, *AChE* 的含量和组织分布均存在差异。研究发现, *AChE* 主要合成于肝脏, 存在于肌肉、肝胰、心脏、肠黏膜、血浆及神经组

织(如脑白质、神经细胞髓鞘)等, 其中在脑组织中的 *AChE* 含量最高<sup>[3]</sup>。在组织中, 也主要存在于胆碱能神经末梢突触间隙, 特别是运动神经终板突触后膜的褶皱中聚集较多。

## 2 国内外对乙酰胆碱酯酶的研究进展

**2.1 污染物对生物体内乙酰胆碱酯酶活性的影响** 1953年, Stedman 等首先从马血清中分离出 *AChE* 后, 不同生物体内的 *AChE* 相继得到分离和研究, 对 *AChE* 的研究也更加广泛。

工业上, 不同形式的金属废物排入环境中, 在生物体内富集, 尤其在低等的无脊椎动物体内, 直接影响机体 *AChE* 的活性, 对动物的生长发育造成一定伤害。李会等<sup>[10]</sup> 研究发现暴露在  $60 \text{ mg/L Fe}^{3+}$  溶液中, 泥鳅脑组织中 *AChE* 活性显著降低 ( $P < 0.05$ ), 表明  $\text{Fe}^{3+}$  对泥鳅具有神经毒性。暴露于毒死蜱 (CHP) 和  $\text{Cu}$  后, 紫贻贝鳃中 *AChE* 的活性也显著降低<sup>[11]</sup>。然而, 暴露在纳米颗粒  $\text{TiO}_2$  中的扇贝组织鳃和消化腺内的 *AChE* 活性都随时间的增长呈上升趋势, 表现出时间-剂量效应关系<sup>[12]</sup>。纳米形式的金属对机体 *AChE* 的影响都不是特别明显, 只有达到一定时间和剂量才会起作用。暴露在  $\text{ZnO}$  纳米颗粒下的蜜蜂, 脑组织中 *AChE* 的活性基本不受影响<sup>[13]</sup>。据此推测, 可能是金属的纳米形式比离子形式的毒性小, 对 *AChE* 的抑制作用也较弱。

除了金属物质外, 各种药物排入环境中, 对 *AChE* 也会产生一定的影响。张丹等<sup>[14]</sup> 研究发现在亚致死浓度 ( $\text{LC}_5$ 、 $\text{LC}_{10}$  和  $\text{LC}_{20}$ ) 胁迫下, 氧化乐果、甲萘威和辛硫磷对摇蚊幼虫

AChE 活性都有明显的抑制作用。熏蒸剂对谷物象鼻虫的 AChE 也有显著的抑制作用<sup>[15]</sup>。相同地,暴露在反式肉桂醛下,果蝇 AChE 活性表现出显著的抑制作用<sup>[16]</sup>。以上污染物都对无脊椎动物机体 AChE 表现出抑制作用,然而可能由于化学药物的不同特性,对 AChE 会有不同的作用。溴化 1-乙基-3-甲基咪唑对斜纹夜蛾 AChE 活性的影响在 LC<sub>20</sub> 浓度处理下呈抑制趋势,LC<sub>50</sub> 浓度处理下呈先抑制后诱导的趋势;溴化 1-丁基-3-甲基咪唑对斜纹夜蛾 AChE 活性的影响在 LC<sub>20</sub> 浓度处理下呈先抑制后诱导的趋势,在 LC<sub>50</sub> 浓度处理下呈抑制趋势;1,2-二甲基咪唑对斜纹夜蛾 AChE 活性的影响在 LC<sub>20</sub> 浓度处理下呈先抑制后诱导的趋势;在 LC<sub>50</sub> 浓度处理下呈先诱导后抑制的趋势,3 种离子液体在斜纹夜蛾体内的积累对体内 AChE 的活性均有不同程度影响,改变生物体内神经信号的传导,导致生物体严重的行为改变、功能紊乱、瘫痪,从而产生毒害作用<sup>[17]</sup>。Deng 等<sup>[18]</sup> 研究发现低浓度的毒死蜱短期对小菜蛾体内 AChE 的活性增加 23.5%~29.8%。同时暴露在杀虫剂氯虫苯甲酰胺和真菌病原体的东亚飞蝗体内 AChE 活性在后期也呈上升趋势<sup>[19]</sup>。

随着对 AChE 研究的不断扩展延伸,AChE 的应用已经深入到医药或疾病治疗等领域。医学研究发现,AChE 不仅参与胆碱能神经递质的传递,而且具有调节和促进神经组织的发育和神经再生的神经营养因子样作用。Prugh 等<sup>[20]</sup> 研究表明暴露于有机磷的间充质干细胞(MSC)的 AChE 活性降低,造成 MSC 分化成骨细胞的能力降低。大量医学研究表明,目前用于阿尔茨海默病(AD)的治疗主要基于 AChE 抑制剂的给药<sup>[21]</sup>,且已经在临床上得到实践。

**2.2 乙酰胆碱酯酶活性改变的机理** 基于目前国内外对 AChE 的广泛研究,污染物对生物体 AChE 的毒性研究越来越受到关注,尤其各种农药对无脊椎动物毒性反应的影响已经成为焦点<sup>[22-23]</sup>。当污染物进入机体与 AChE 相互作用时,与 AChE 活性中心的丝氨酸发生不可逆反应,产生一个更稳定的污染物-乙酰胆碱酯酶络合物,使 AChE 不能有效水解 ACh,在体内大量积累,受体不断被激活,突触后神经纤维长期处于兴奋状态,引起战栗、痉挛<sup>[24]</sup>。然而,过量的 ACh 又可以造成去极化阻断,从而抑制了神经传导,使机体后期逐渐失去活动能力,昏迷死亡。

不同污染物对 AChE 的影响程度还取决于污染物和酶的化学特性。AChE 有多个不同的结合部位,不同污染物对它们的结合能力不同,影响作用也不同。Dos Santos Miron 等<sup>[24]</sup> 研究发现污染物诱导 AChE 活力上升,推测可能是由于机体在应对外源污染物时的一种应激机制,通过加快 AChE 的合成来补偿污染物对机体产生的胁迫。AChE 活力升高表明神经递质胆碱水解增强,引起烟碱和毒蕈碱受体活化下降,造成正常的神经信息传递也受到影响,导致实验动物中毒。AChE 活性的下降,表明污染物浓度的升高,对机体的神经毒性增大,酶活力中心丝氨酸受到抑制,酶的结构发生改变,酶失活;也可能是因为大量的活性氧自由基抑制了酶的活力<sup>[25]</sup>。

**2.3 污染物对水蚤乙酰胆碱酯酶的影响** 枝角类作为食物

链中的关键物种,在食物链中起重要的作用。水蚤营养价值高、繁殖快、适口性好,适合大量培养,是许多水产品动物的饵料,对多种有毒物质敏感,是毒性试验中普遍采用的标准试验材料。因此,枝角类的饵料价值和应用前景已引起国内外学者的广泛关注。通过对污染物胁迫无脊椎动物 AChE 机理的研究,分析污染物对水蚤 AChE 活性的影响。

研究发现,对乙酰氨基酚(镇痛药)和双氯芬酸(抗炎药)的摄入显著抑制了大型蚤的 AChE 活性,说明对乙酰氨基酚和双氯芬酸具有干扰大型蚤神经传递的能力<sup>[26]</sup>。Toumi 等<sup>[27]</sup> 研究表明将大型蚤暴露在氰菊酯和拟除虫菊酯杀虫剂下,AChE 活性均显著降低。大型蚤在 AgNPS 下胁迫 48 h,随着 AgNPS 浓度的升高,AChE 活性升高,与 Ulm 等<sup>[28]</sup> 的研究结果一致。

通过对水蚤 AChE 的研究,发现不同污染物对水蚤 AChE 有不同程度的影响,这可能与污染物的化学特性有关,不同污染物与机体酶的结合能力不同,而且对 AChE 的效应时间和剂量也不同。

### 3 小结与展望

AChE 是生物神经传导中的一种关键性的酶。低等无脊椎动物在污染物的胁迫下,AChE 可作为一种生物指示剂来监测环境的污染情况。大量研究表明,大多数无脊椎动物在污染物的胁迫下,AChE 活性随着污染物浓度的升高会呈现下降趋势,使得动物机体神经中毒,甚至导致死亡。

水蚤作为一种甲壳类水生动物,在水环境系统食物链中起着关键作用。当机体受到污染物胁迫时,水蚤 AChE 能迅速发生变化,为监测水质污染、保护生态环境和防治污染物提供科学依据,同时也可作为今后研究工作的开展奠定理论基础并提供技术支撑。

随着分子技术、基因工程和计算机模拟技术等的发展,这些成果被广泛应用到水环境污染监测、农药残留检测、生态环境保护以及人类疾病治疗等领域。利用分子生物学技术,检测水体动物体内 AChE 的活性及其基因等一系列变化来反映水环境的污染情况。通过点突变技术和基因克隆技术获得对有机磷和氨基甲酸酯类化合物敏感的乙酰胆碱酯酶的 cDNA 序列,利用基因克隆使其在微生物中大量表达,提取大量敏感性的 AChE,用于研制生物传感器,检测农产品或环境中的有机磷和氨基甲酸酯类农药的含量<sup>[29]</sup>。在疾病防治方面,某些疾病(如阿尔茨海默病、重症肌无力病等)的发生也与 AChE 有密切的关系。Zhang 等<sup>[30]</sup> 研究发现在动物细胞凋亡过程中会表达特异性带尾亲水型的 AChE,这为肿瘤以及其他功能性疾病的检测提供了新思路。

### 参考文献

- [1] ZEIN M A, MCEL MURRY S P, KASHIAN D R, et al. Optical bioassay for measuring sublethal toxicity of insecticides in *Daphnia pulex* [J]. Environmental toxicology & chemistry, 2014, 33(1): 144-151.
- [2] SÁNCHEZ-BAYO F. Comparative acute toxicity of organic pollutants and reference values for crustaceans. I. Branchiopoda, Copepoda and Ostracoda [J]. Environmental pollution, 2006, 139(3): 385-420.
- [3] 何东海, 孟范平, 朱小山. 有机磷农药对海洋动物乙酰胆碱酯酶(AChE)的毒性效应研究进展[J]. 海洋通报, 2003, 22(6): 71-78.
- [4] 孙曼曼, 周廷冲. 乙酰胆碱酯酶的结构和功能[J]. 生物化学与生物物

- 理进展, 1981(3):1-4.
- [5] 刘铭钧,李盾,高俊娥. 乙酰胆碱酯酶基因工程技术研究进展[J]. 生物技术, 2008, 18(2):84-87.
- [6] ESCARTÍN E, PORTE C. Bioaccumulation, metabolism, and biochemical effects of the organophosphorus pesticide fenitrothion in *Procambarus clarkia* [J]. Environmental toxicology & chemistry, 1996, 15(6):915-920.
- [7] WIKLUND A K E, ADOLFSSON-ERICI M, LIEWENBORG B, et al. Sucralose induces biochemical responses in *Daphnia magna* [J]. PLoS One, 2014, 9(4):1-6.
- [8] 吉丽娜. 乙酰胆碱酯酶在细胞凋亡中的作用[D]. 上海:中国科学院上海生命科学研究院生物化学与细胞生物学研究所, 2006.
- [9] 杨筱珍,黄坚,李彤,等. 中华绒螯蟹中肠和后肠内 AchE 和 NOS 神经元的观察以及 Ach、NO 含量和 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>-ATP 活性的分析[J]. 水产学报, 2015, 39(7):989-997.
- [10] 李会,付崇罗,张亮. Fe<sup>3+</sup>对泥鳅脑组织 AchE 活性的影响[J]. 湖北农业科学, 2014(10):2373-2375.
- [11] PERIĆ L, NERLOVIĆ V, ŽURGA P, et al. Variations of biomarkers response in mussels *Mytilus galloprovincialis* to low, moderate and high concentrations of organic chemicals and metals [J]. Chemosphere, 2017, 174:554-562.
- [12] XIA B, ZHU L, HAN Q, et al. Effects of TiO<sub>2</sub> nanoparticles at predicted environmental relevant concentration on the marine scallop *Chlamys farreri*: An integrated biomarker approach [J]. Environmental toxicology & pharmacology, 2017, 50:128-135.
- [13] GLAVAN G, MILIVOJEVIĆ T, BOZIĆ J, et al. Feeding preference and sub-chronic effects of ZnO nanomaterials in honey bees (*Apis mellifera carnica*) [J]. Archives of environmental contamination & toxicology, 2017, 72(3):471-480.
- [14] 张丹,陈增菊,李谨谨,等. 3 种农药对花翅蚜蚊毒力和 AchE 活性影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(12):3565-3567.
- [15] LIAO M, XIAO J J, ZHOU L J, et al. Insecticidal activity of *Melaleuca alternifolia* essential oil and RNA-Seq analysis of *Sitophilus zeamais* transcriptome in response to oil fumigation [J]. PLoS One, 2016, 11(12):167748.
- [16] KIM J, JANG M, SHIN E, et al. Fumigant and contact toxicity of 22 wooden essential oils and their major components against *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) [J]. Pesticide biochemistry & physiology, 2016, 133:35-43.
- [17] 卢嫚,罗帅,韩旭洋,等. 离子液体对靶标生物和非靶标生物 AchE 的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(19):6250-6252, 6299.
- [18] DENG Z Z, ZHANG F, WU Z L, et al. Chlorpyrifos-induced hormesis in insecticide-resistant and susceptible *Plutella xylostella* under normal and high temperatures [J]. Bulletin of entomological research, 2016, 106(3):378-386.
- [19] JIA M, CAO G, LI Y, et al. Biochemical basis of synergism between pathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* and insecticide chlorantraniliprole in *Locusta migratoria* (Meyen) [J]. Scientific reports, 2016, 6:28424.
- [20] PRUGH A M, COLE S D, GLAROS T, et al. Effects of organophosphates on the regulation of mesenchymal stem cell proliferation and differentiation [J]. Chemo-biological interactions, 2017, 266:38-46.
- [21] CRUZ I, PUTHONGKING P, CRAVO S, et al. Xanthone and flavone derivatives as dual agents with acetylcholinesterase inhibition and antioxidant activity as potential anti-alzheimer agents [J]. Journal of chemistry, 2017(3):1-16.
- [22] JANSEN M, VERGAUWEN L, VANDENBROUCK T, et al. Gene expression profiling of three different stressors in the water flea *Daphnia magna* [J]. Ecotoxicology, 2013, 22(5):900-914.
- [23] PEREIRA J L, HILL C J, SIBLY R M, et al. Gene transcription in *Daphnia magna*: Effects of acute exposure to a carbamate insecticide and an acetanilide herbicide [J]. Aquatic toxicology, 2010, 97(3):268-276.
- [24] DOS SANTOS MIRON D, CRESTANI M, SHETTINGER M R, et al. Effects of the herbicides clomazone, quinclorac, and metsulfuron methyl on acetylcholinesterase activity in the silver catfish (*Rhamdia quelen*) (Heptapteridae) [J]. Ecotoxicology & environmental safety, 2005, 61:398-403.
- [25] 刘占峰. 污水对多刺裸腹蚤在生理生化水平的影响[D]. 太原:山西大学, 2008.
- [26] OLIVEIRA L L D, ANTUNES S C, GONÇALVES F, et al. Evaluation of ecotoxicological effects of drugs on *Daphnia magna*, using different enzymatic biomarkers [J]. Ecotoxicology & environmental safety, 2015, 119:123-131.
- [27] TOUMI H, BOUMAIZA M, MILLET M, et al. Is acetylcholinesterase a biomarker of susceptibility in *Daphnia magna* (Crustacea, Cladocera) after deltamethrin exposure? [J]. Chemosphere, 2015, 120:351-356.
- [28] ULM L, KRIVOHAVEK A, JURA S, D. Response of biochemical biomarkers in the aquatic crustacean *Daphnia magna* exposed to silver nanoparticles [J]. Environmental science and pollution research, 2015, 22(24):19990-19999.
- [29] 张明,李盾,陈义本,等. 乙酰胆碱酯酶分子生物学研究进展[J]. 农药, 2006, 45(1):8-11.
- [30] ZHANG X J, YANG L, ZHAO Q, et al. Induction of acetylcholinesterase expression during apoptosis in various cell types [J]. Cell death & differentiation, 2002, 9(8):790-800.

(上接第 3 页)

### 3 结语

该研究对土壤样品进行异常样本的剔除,避免影响有机碳含量预测精度。运用反射率、一阶微分以及连续统去除 3 种光谱数据进行多元逐步回归(SMLR)和偏最小二乘回归分析(PLSR),发现一阶微分变换下的 SMLR 和 PLSR 效果最好。当研究的土壤样本中某一物质组含量较低且无明显的吸收峰时,进行微分变换后,易找到相关性高的波段,使得该方法在反演土壤成分含量时应用较多;当土壤光谱信息重叠时,微分变换还可以扩大光谱之间的特征差异,故在土壤属性的反演和类型区分上较多使用。对于所建模型结果,PLSR 精度总体上比 SMLR 要高一些,尤其是建模精度。PLSR 解决了自变量之间的多重共线性问题,能提供更可靠的建模结果,对于样本个数小于自变量个数的情况下比较有利。验证集的预测值和实测值散点图也表明了整体性 PLSR 优于 SMLR,因此 PLSR 具有快速预测有机碳含量的潜力。

### 参考文献

- [1] BOWERS S, HANKS R J. Reflection of radiant energy from soils [J]. Soil

science, 1965, 100(2):130-138.

- [2] 徐彬彬,季耿善,朱永豪. 中国陆地背景和土壤光谱反射特性的地理分区的初步研究[J]. 环境遥感, 1991, 6(2):142-151.
- [3] VAN WAES C, MEATDAGH I, LOOTENS P, et al. Possibilities of near infrared reflectance spectroscopy for the prediction of organic carbon concentrations in grassland soil [J]. Journal of agricultural science, 2005, 143(6):487-492.
- [4] 卢艳丽,白由路,杨柳苹,等. 基于主成分回归分析的土壤有机质高光谱预测与模型验证[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6):1076-1082.
- [5] 张芳,熊黑钢,龙桃,等. 实测反射率与影像反射率对土壤碱化预测的对比分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(1):227-232.
- [6] 王欣. 近红外分析中光谱预处理方法的研究与应用进展[J]. 科技资讯, 2013(15):2.
- [7] CLOUTIS E A. Hyperspectral geological remote sensing: Evaluation of analytical techniques [J]. International journal of remote sensing, 1996, 17(12):2215-2242.
- [8] 于士凯,姚艳敏,王德营,等. 基于高光谱的土壤有机质含量反演研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(23):146-152.
- [9] 谢伯承,薛绪掌,刘伟东,等. 基于包络线法对土壤光谱特征的提取及其分析[J]. 土壤学报, 2005, 42(1):171-175.
- [10] 纪文君. 基于野外 vis-NIR 高光谱的土壤属性预测及田间水分影响去除研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014:67-72.