应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2021, 58(1): 57–65. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2021.005

辣椒生理代谢及其昆虫种群对特高压电场的响应*

何帅洁[1**] 刘兴发[2] 张建功[2] 郑晓旭[1] 李雪梅[1] 肖能文[3***] 吴 刚[1***]

（1. 华中农业大学植物科技学院，武汉 430070；2. 电网环境保护湖北省重点实验室，中国电力科学研究院，武汉 430074；3. 中国环境科学研究院生态研究所，北京 100012）

摘 要 **【目的】** 通过研究不同电磁场强度对辣椒生长发育、生理代谢、田间害虫和天敌种群数量的影响，客观评价特高压电场曝露对植物和昆虫的生态环境安全性。**【方法】** 将田间种植的辣椒持续曝露在强度为 0、2 和 10 kV/m 的电磁场下，测定辣椒在不同强度电磁场下的生长发育和氧化酶（超氧化物歧化酶，SOD；过氧化氢酶，CAT；过氧化物酶，POD）和解毒酶活性（谷胱甘肽-*S*-转移酶，GST），并调查不同强度的电磁场下辣椒田间害虫和天敌种群数量。**【结果】** 随着曝露时间的增长，2 kV/m 强度电磁场处理下 5 月 30 日、6 月 10 日调查到的辣椒株高较 0 kV/m 和 10 kV/m 处理组显著增加（$P<0.05$），2 kV/m 强度电磁场处理下辣椒茎粗较 0 kV/m 和 10 kV/m 处理组显著增加（$P<0.05$），调查后期（6 月 10 日、6 月 20 日）2 kV/m 强度电磁场处理下叶绿素的含量与 0 kV/m 无明显差异、显著高于 10 kV/m。酶活力测定结果表明，总体上来说空白对照组的酶活力是低于处理组（2 kV/m、10 kV/m）酶活力的，2 kV/m 处理下辣椒苗期和花期 POD 和 GST 活力显著高于对照处理（$P<0.05$），10 kV/m 处理下辣椒结实期 SOD 和 POD 活力显著高于 2 kV/m 处理（$P<0.05$），而 2 kV/m 和 10 kV/m 处理下辣椒结实期 CAT 活力显著低于 0 kV/m 处理（$P<0.05$）。害虫种群动态结果表明，10 kV/m 处理下黄守瓜 *Aulacophora indica*（Gmelin）和瓜蓟马 *Thrips fevas* Schrank 种群数量显著低于 2 kV/m 处理（$P<0.05$），而 2 kV/m 处理下瓜蚜 *Catton aphid* 种群数量显著高于 10 kV/m 处理（$P<0.05$）。天敌种群动态结果表明，10 kV/m 处理下草间小黑蛛 *Hylyphantes graminicola* (Sundevall, 1829)和中华草蛉 *Chrysoperla sinica* Tjeder 种群数量显著高于 0 kV/m 和 10 kV/m 处理（$P<0.05$）。**【结论】** 2 kV/m 电磁场对辣椒的生长发育有促进作用，10 kV/m 电磁场处理可显著增加辣椒结实期的 SOD 和 POD 酶活力。随着电磁场强度的增加，10 kV/m 处理下，辣椒植株上主要害虫黄守瓜和瓜蓟马种群数量显著降低，而 10 kV/m 处理下田间天敌草间小黑蛛和中华草蛉种群数量显著增加。

关键词 特高压电场；辣椒；酶活性；害虫；天敌

Effect of exposure to a UHV electric field on the physiological metabolism, and insect community, of pepper plants

HE Shuai-Jie[1**] LIU Xing-Fa[2] ZHANG Jian-Gong[2] ZHENG Xiao-Xu[1]
LI Xue-Mei[1] XIAO Neng-Wen[3***] WU Gang[1***]

(1. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Province Key Laboratory of Power Network Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. Institute of Ecology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract **[Objectives]** To evaluate the effect of different UHV electric fields on the development of pepper plants, and on populations of insect pests and their natural enemies on these plants, in order to evaluate the environmental safety of UHV electric fields for both plants and insects. **[Methods]** Pepper plants were continuously exposed to three UHV electric fields

*资助项目 Supported projects：国家电网公司科技项目（GY71-16-008）

**第一作者 First author，E-mail：845634326@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：xiaonw@163.com；wugang@mail.hzau.edu.cn

收稿日期 Received：2020-11-15；接受日期 Accepted：2020-12-31

(0, 2, 10 kV/m) in the field, and their growth and the enzyme (superoxide dismutase SOD, catalase CAT, Peroxidase POD, glutathione sulfhydryl transferase, GST) activity in their leaves, measured and compared. Populations of pests and their natural enemies were also quantified. **[Results]** Plants in the 2 kV/m electric field treatment were significantly taller and had thicker stem diameters than those in the 0 kV/m and 10 kV/m treatments (P<0.05). Plants in the 2 kV/m electric field treatment and also had significantly higher SOD and POD activity than those in the 0 kV/m and 10 kV/m treatments during the seedling and flowering period (P<0.05). SOD and POD activity increased significantly in the 10 kV/m electric field treatment compared to the 2 kV/m treatment (P<0.05). However, CAT activity was significantly lower in the 2 kV/m and 10 kV/m electric field treatments than in the 0 kV/m treatment. With respect to pest abundance, significantly fewer *Aulacophora indica* and *Thrips flevas* were found in the 10 kV/m electric field treatment than in the 2 kV/m treatments (P<0.05). However, *Aphis gossypol* numbers were significantly higher in the 2 kV/m electric field treatment relative to the 10 kV/m treatments (P<0.05). With respect to the natural enemies of pests, significantly more *Hylyplantes graminicola* and *Chrysoperla sinica* were found in the 10 kV/m electric field treatment than in the 0 kV/m and 2 kV/m treatments (P<0.05). **[Conclusion]** Pepper plants grew significantly better in the 2 kV/m than in the 0 kV/m and 10 kV/m electromagnetic field treatments. However, SOD and POD enzyme activity were significantly increased in the 10 kv/m UHV electric field treatment during the fruiting stage. Numbers of the pests *A. indica* and *T. flevas* were significantly lower, and numbers of their natural enemies *H. graminicola* and *C. sinica* significantly higher, in the 10 kV/m UHV electric field treatment than the 0 kV/m and 2 kV/m treatments.

Key words UHV electric field; pepper; nutrients; enzyme activity; pests; natural enemies

随着中国社会经济的发展，工矿企业和城乡居民用电量迅速增长，国家在投入巨资进行基础电力设施建设的同时，也加大了城乡电网的建设和改造力度，大型高压输变电工程也愈发普遍（邵红和聂佳妍，2009）。在赵刚等（2007）对特高压的研究中表明，特高压的输电系统在安全性、成本以及无用功的消耗方面，都是要优于普通高压输电系统。相应的，随着高压与特高压输电系统的普及，其电磁场又会对环境造成一定程度的影响，如信号干扰、工频电磁场辐射、生态影响等（毛文奇等，2004）。

近年来，关于特高压电磁场对生态环境的影响越来越受到关注，特高压电磁场的环境安全性评价工作也在持续进行。有研究表明，特高压电磁场曝露可使植物细胞内钙离子水平发生改变，而钙离子信号的改变往往和一系列生物学抗逆过程紧密相关，如渗透压、氧化胁迫、缺氧、机械损伤等一些常见的逆境胁迫下的应答，进而会对植物的生长发育造成影响（胡白雪，2006）。因此，一定强度的电磁场环境是一种逆境状态下的生长环境，对植物的生长发育和生理代谢会造成不同程度的影响（Knight，1999）。如射频磁场处理后，绿豆种子的生根数量和根长均会受到较为严重的影响（Singh *et al.*，2012）；玉米种子胚芽鞘的生长也会因为射频磁场的影响而受阻（Halgamuge *et al.*，2015）。Reina 和 Pascual 等（2001）研究发现电磁场处理会导致植物细胞膜内外离子浓度发生变化，从而使渗透压发生改变，对植物生长发育极为不利。然而，电磁场对植物生长发育的影响也有积极的一面。例如，陈全光（2012）利用不同电磁场强度处理樟子松和长白落叶松后发现，随着处理时间的增加，植物组织中叶绿素含量、酶活性和含水量均出现了先增后减的现象，并证明了在合适的处理时间下，适宜的磁场强度能提高樟子松和长白落叶松的抗逆性。周娜娜等（2018）在高压电场对蔬菜生长及营养成分的影响的研究中发现，电磁场处理可促进蔬菜生长，提高蔬菜品质。还有学者提出，我们可以利用高压电场这项物理技术处理植物种子，提高其萌发活力，促进农业增产增效（陈全光，2012；陈建中，2016）。可见，电磁场可对植物的生长发育和生理代谢的影响是多方面的，没有一个统一的定论，需要我们持续的关注和研究。

除了对植物的生长发育和生理代谢有不同程度影响外，特高压电场曝露也可影响动物的生长发育、繁殖、变异、死亡率等（Cucurachi *et al.*，2013）。例如，对 24 周的成年雄大鼠进行极低频

电磁场的持续处理，结果表明成年大鼠在取食行为、记忆以及认知能力等方面和对照处理无显著差异（Lai *et al.*，2015）。而 40 Hz 极低频电磁场下持续曝露 21 d 的大鼠，其体重在处理 1 周后显著增加，2 周之后又显著下降（Mahdavi *et al.*，2017）。上述研究主要集中在鼠类生长发育和繁殖上，而不同电磁场对昆虫的生长发育和行为的研究还较少。Panagopoulos 和 Margaritis（2010）利用射频电磁场处理果蝇成虫，研究结果表明果蝇成虫的生殖能力明显下降。研究发现电磁场强度的降低会延长棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner 和褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål)生长发育历期，降低褐飞虱产卵量，影响飞虱翅型分化等（董兆克和戈峰，2013；Wang *et al.*，2018）。射频磁场的处理会对蜜蜂的觅食飞行造成一定程度的影响，蜜蜂的体重也会出现明显下降（Favre，2011）。

在我国的特高压输电工程中，高压线下产生的电场强度为 10 kV/m 以下（顾南峰，1986），本文通过研究不同电磁场强度（0，2，10 kV/m）对辣椒生长发育和酶活性（包括超氧化物歧化酶 SOD、过氧化氢酶 CAT、过氧化物酶 POD 以及谷胱甘肽巯基转移酶 GST）的影响，并调查辣椒田田间害虫和天敌种群数量，其研究结果可客观评价特高压电场曝露对植物和昆虫的生态安全性，为其环境安评工作提供参考数据。

1　材料与方法

1.1　户外工频电场曝露装置

本研究选用 3 块独立的网状金属极板，人为控制电压分别在 26、5.2 和 0 kV，极板距离地面 2.6 m，因此曝露区的电场强度分别为 10、2 和 0 kV/m。设置不通电的网状金属极板作为对照。每个曝露区长 6 m，宽 5 m，面积 30 m^2。为消除曝露区电场之间的干扰，每个曝露区之间间隔 2 m。网状金属极板电压在电场电源接通后的电压为 U，与地面间的距离为 d，产生均匀的工频电场为 E = U/d（肖敦煌，2014）（图 1）。

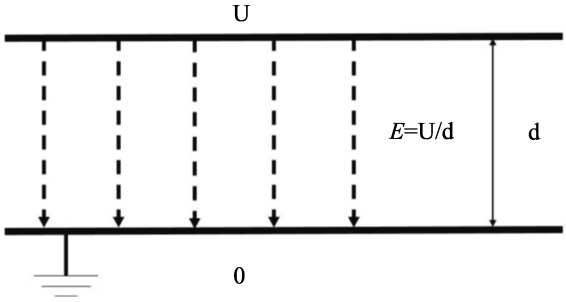

图 1　电场强度计算示意图

Fig. 1　Schematic diagram of electric field intensity calculation

E：网状金属极板电压；
d：网状金属极板地面间的距离；U：工频电场。
E: Grid metal plate voltage; d: The distance between the ground of the mesh metal plate; U: Power frequency electric field.

1.2　辣椒种植方法及管理

辣椒品种为“佳美四号”购自湖北武汉花卉大市场，由湖北省农业科学院经济作物研究所研发，适合在武汉地区种植栽培。辣椒幼苗（种植密度：20 cm×30 cm）随机种植于 0、2 和 10 kV/m^3 种不同的电场强度曝露区域（小区长宽：6.5 m×1.5 m）。每个试验小区翻耕时施 0.5 kg 撒可富复合肥，辣椒幼苗移栽后进行常规浇水和人工除草，并于辣椒幼苗期进行间苗。

1.3　辣椒生长势及叶绿素测定

在辣椒三叶期后每隔 10 d 调查 1 次，分别于 5 月 10 日、5 月 20 日、5 月 30 日、6 月 10 日、6 月 20 日进行调查采集，每个曝露区五点取样，每点 3 株，共 15 株。株高：辣椒地上部分基部到顶端的距离；茎粗：离地 5 cm 处植株茎的直径。功能叶片数采用五点取样法，每个点选择 1 株，共测 5 株。叶绿素采用 SPAD-502Plus 仪（A1RT-206，KONICA MINOLTA）固定倒 4 叶进行测定。

1.4　辣椒叶片酶活力的测定

依据肖敦皇（2014）对电场曝露对油菜影响的研究，分别在辣椒作物的苗期（75%的幼苗出土，子叶平展）、花期（75%植株主茎开花）和

结实期（75%以上植株开始挂果结实），选择辣椒上、中、下部位摘取叶片，并将采集的叶片置于－20 ℃冰箱保存。用于测试超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）、过氧化物酶（POD）及谷胱甘肽-*S*-转移酶（GST）活性，酶活性的测定方法均参照南京建成科技有限公司提供的试剂盒说明书。每个处理 6 次生物学重复。

1.5 不同电磁下强度下对昆虫种群的影响

在辣椒的苗期、花期和结实期，采用五点采样法，每个点选择取 1 m^2 内的植株。采用目测法、扫网法采集植株上的所有的害虫和天敌，并将捕获到的昆虫放入棉层或装有酒精的小瓶内保存，将采集到的昆虫带回室内进行种类鉴定和数量统计。

1.6 数据分析

数据采用 SPSS 2013 统计分析，差异显著性分析采用 Duncan’s 多重比较，所有图片均采用 Excel 2019 做图。

2 结果与分析

2.1 不同强度电磁场处理对辣椒生长发育的影响

随着辣椒的生长发育，3 种强度电磁场处理下辣椒的株高、总功能叶片数和茎粗均呈现逐渐增长的趋势（图 2）。在不同调查时间，不同电磁场处理对辣椒株高无显著影响（P>0.05）（图 2：A）。电磁场强度为 2 kV/m 处理组在 5 月 10 日、5 月 20 日调查中低于 0 kV/m 和 10 kV/m 处理组（图 2：B），而在 5 月 30 日、6 月 10 日和 6 月 20 日均高于 0 kV/m 和 10 kV/m 处理组的，尤其是在 6 月 10 日与 6 月 20 日，2 kV/m 强度电磁场处理下辣椒叶片总功能叶片数是显著高于另两个处理组的（P<0.05）（图 2：B）。不同电磁场处理对辣椒茎粗影响的结果显示，3 种强度电磁场处理在 5 月 10 日、5 月 20 日、5 月 30 日对辣椒茎粗无显著影响（P>0.05）（图 2：C），而 10 kV/m 强度电磁场处理组在 6 月 10 日辣椒茎粗显著高于 0 kV/m 和 2 kV/m 强度电磁场处理组（P<0.05）（图 2：C）。6 月 20 日调查的辣椒茎粗，2 kV/m 强度电磁场处理组高于 0 kV/m 和 10 kV/m 处理组，但与 10 kV/m 处理组的株高无显著差异 P>0.05（图 2：C）。

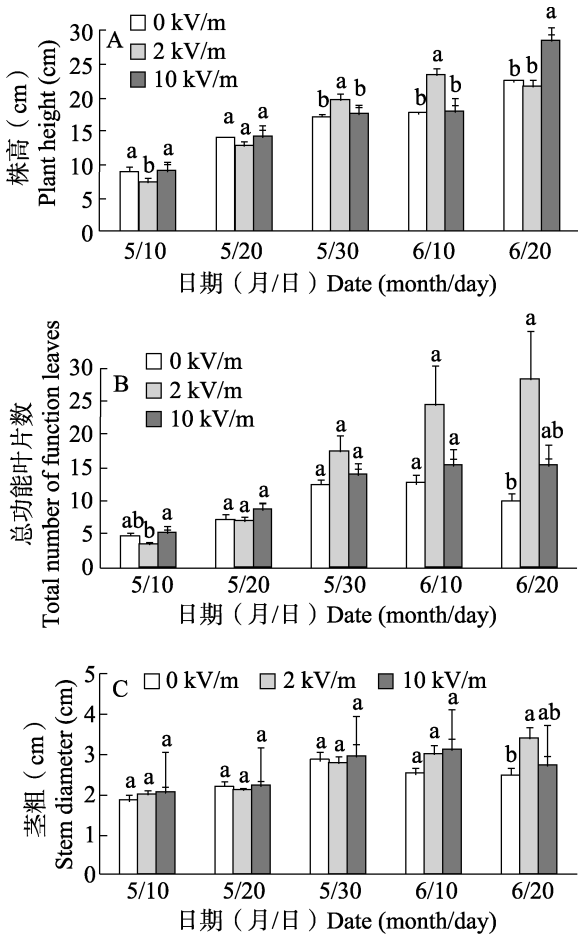

图 2 不同强度电磁场对辣椒生长发育的的影响

Fig. 2 Effects of electromagnetic fields with different strengths on plant height, stem diameter, total functional leaf number and chlorophyll content

A. 不同电磁场处理辣椒的株高；B. 不同电磁场处理辣椒总功能叶片数；C. 不同电磁场处理辣椒的茎粗。

A. The plant height of pepper was treated by different electromagnetic fields; B. The total number of function leaves of pepper was treated by different electromagnetic fields; C. The stem diameter of pepper was treated by different electromagnetic fields.

柱上标有不同小写字母代表不同电磁场处理间差异显著（P<0.05，Duncan’s 多重比较检验）。下图同。

Histograms with different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level by Duncan’s multiple range tests among different farming technologies. The same below.

2.2　不同强度电磁场处理对辣椒叶绿素含量的影响

不同电磁场处理对辣椒叶绿素含量影响如图 3 所示，3 种强度电磁场处理在 5 月 10 日、5 月 20 日、5 月 30 日对辣椒叶绿素含量无显著影响（P>0.05），在 6 月 10 日、6 月 20 日，电磁场 10 kV/m 强度处理组的叶绿素含量显著低于 0 kV/m 和 2 kV/m 强度处理组的（P<0.05）。

2.3　不同强度电磁场处理对辣椒叶片酶活力的影响

不同强度电磁场处理对辣椒叶片 4 种酶活力的影响如图 4 所示。随着辣椒的生长育，不同强度电磁场处理的叶片 POD 活力呈现出先下降后增高的趋势（图 4：A）。3 种电磁场处理对辣椒幼苗期、开花期叶片 POD 活力无显著影响（P>0.05），而 2 kV/m 强度电磁场处理组在辣椒结实期 POD 活力显著低于 0 kV/m、10 kV/m 处理组（P<0.05）（图 4：A）。3 种强度电磁场处理对辣椒苗期叶片 SOD 活力无显著影响（P>0.05），而 0 kV/m 处理组在辣椒开花期显著低于 2 kV/m 和 10 kV/m 强度的（P<0.05），2 kV/m 处理组在辣椒结实期显著低于 0 kV/m 和 10 kV/m

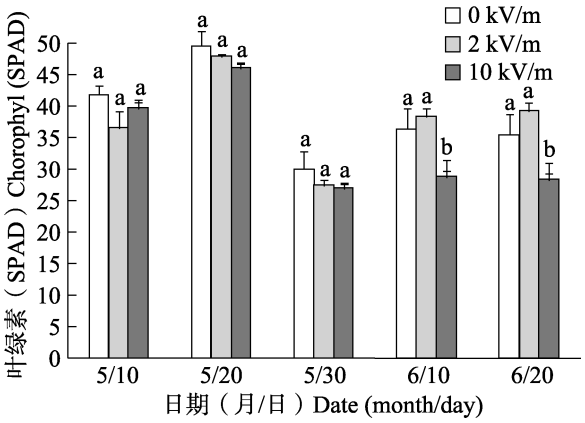

图 3　不同强度电磁场对辣椒叶绿素含量的的影响

Fig. 3　Effects of electromagnetic fields with different intensities on chlorophyll content in pepper

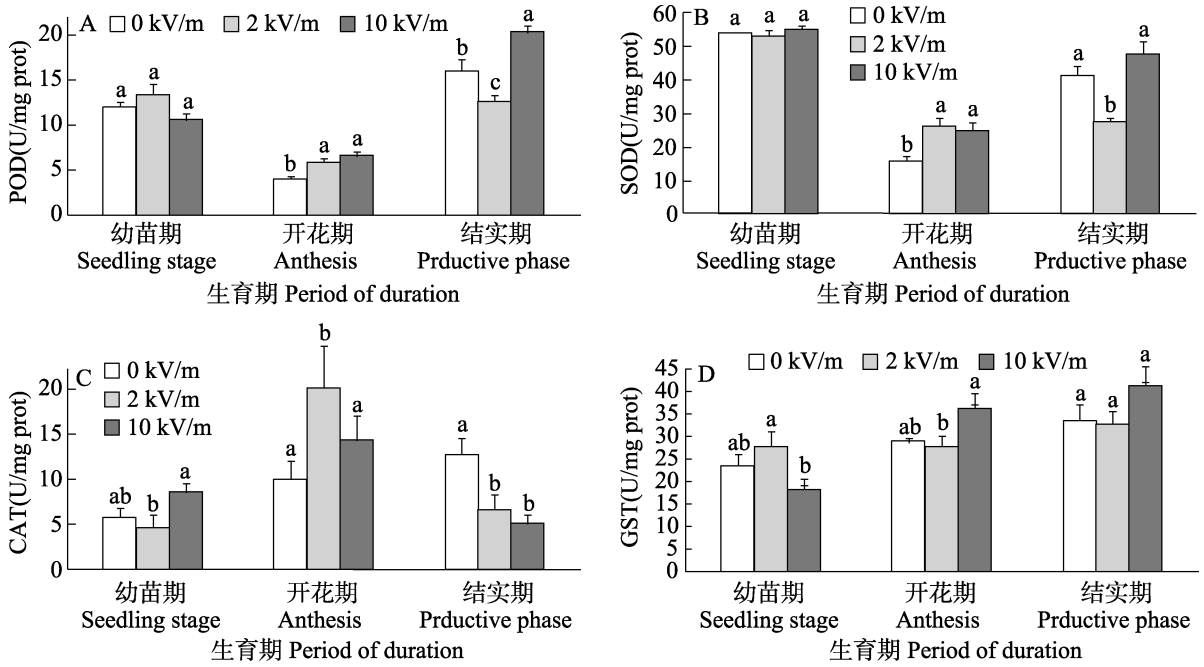

图 4　不同强度电磁场对辣椒叶片酶力的影响

Fig. 4　Effects of electromagnetic fields of different strengths on the enzyme activity of pepper leaves

A. 不同电磁场处理辣椒叶片 POD 含量；B. 不同电磁场处理辣椒叶片 SOD 含量；C. 不同电磁场处理辣椒叶片 CAT 含量；D. 不同电磁场处理辣椒叶片 GST 含量。

A. POD content in pepper leaves treated with different electromagnetic fields; B. SOD content in pepper leaves treated with different electromagnetic fields; C. CAT content in pepper leaves treated with different electromagnetic fields; D. POD content in pepper leaves treated with different electromagnetic fields.

强度电磁场处理组的（$P<0.05$）（图 4：B）。3 种强度电磁场处理对辣椒幼苗期叶片 CAT 活力无显著影响（$P>0.05$），2 kV/m 处理组 CAT 活力在辣椒开花期显著高于 0 kV/m 和 10 kV/m 强度电磁场处理组（$P<0.05$），而 0 kv/m 处理组 CAT 活力在辣椒结实期显著高于 2 kV/m 和 10 kV/m 强度电磁场处理组（$P<0.05$），（图 4：C）。2 kV/m 处理组 GST 活力在辣椒苗期高于 10 kV/m 强度电磁场处理组（$P<0.05$）（图 4：D），而 2 kV/m 处理组 GST 活力在辣椒花期显著低于 10 kV/m 强度电磁场处理组（$P<0.05$）（图 4：D），0 kV/m 处理组 GST 活力在辣椒结实期与 2 kV/m 和 10 kV/m 强度电磁场处理组无明显差异（$P<0.05$）（图 4：D）。

2.4 不同强度电磁场处理对辣椒田间害虫种群数量的影响

表 1 结果显示，辣椒田间主要害虫包括条蜂缘蝽 *Riptortus linearis*、黄守瓜 *Aulacophora indica*、红蜘蛛 *Tetranychus cinnbarinus*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、瓜蓟马 *Thrips flevas*、瓜蚜 *Aphisgossypol* 和中黑盲蝽 *Adelphocoris suturalis*。不同强度电磁场处理对辣椒田间害虫种群数量影响的结果显示，3 种强度电磁场处理对辣椒田间条蜂缘蝽和中黑盲蝽种群数量无显著影响（$P>0.05$）。10 kV/m 强度电磁场电磁场处理组黄守瓜种群数量显著低于 0 kV/m 和 2 kV/m 强度电磁场处理组的（$P<0.05$），而 10 kV/m 强度电磁场处理组红蜘蛛种群数量显著高于 0 kV/m 和 2 kV/m 强度电磁场处理组（$P<0.05$）。10 kV/m 强度电磁场处理组甜菜夜蛾种群数量显著高于 2 kV/m 强度电磁场处理组（$P<0.05$），而 0 kV/m 和 10 kV/m 强度电磁场处理间甜菜夜蛾种群数量无显著差异（$P>0.05$）。2 kV/m 强度电磁场处理组瓜蓟马和瓜蚜种群数量显著高于 0 kV/m 和 10 kV/m 处理组（$P<0.05$），而瓜蓟马在 0 kV/m 和 10 kV/m 强度电磁场处理组之间无显著差异（$P>0.05$）。而中黑盲蝽在 0、2 和 10 kV/m3 种电磁场处理组间无显著差异（$P>0.05$）（表 1）。

表 1 不同强度电磁场处理对辣椒田间害虫种群数量的影响

Table 1 Effect of different electromagnetic field treatments on the pest population of pepper plants

种类 Species	害虫数量（只/m^2）Numbers of pest (ind./m^2)		
	0 kV/m	2 kV/m	10 kV/m
条蜂缘蝽 *Riptortus linearis*	0.136 8±0.059 2a	0.102 6±0.102 6a	0.205 1±0.102 6a
黄守瓜 *Aulacophora indica*	0.205 1±0.102 6 a	0.341 9±0.118 4a	0.102 6±0.102 6b
红蜘蛛 *Tetranychus cinnbarinus*	0.136 8±0.059 2b	0.205 1±0.102 6b	0.410 3±0.102 6a
甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*	0.068 4±0.059 2ab	0.034 2±0.059 2b	0.102 6±0.102 6a
瓜蓟马 *Thrips flevas*	0.136 8±0.059 2b	0.307 7±0.102 6a	0.136 8±0.059 2b
瓜蚜 *Aphis gossypol*	0.547 0±0.118 4b	0.991 5±0.156 7a	0.341 9±0.059 2b
中黑盲蝽 *Adelphocoris suturalis*	0.034 2±0.059 2a	0.010 3±0.000 1a	0.068 4±0.059 2a

表中同一行数据后标有不同小写字母代表不同电磁场处理间差异显著（$P<0.05$，Duncan's 多重比较检验）。下表同。
The data followed by different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level by Duncan's multiple range tests among different farming technologies. The same below.

2.5 不同强度电磁场处理对辣椒田间天敌种群数量的影响

表 2 结果显示，辣椒田间主要天敌包括食蚜蝇科 Syrphus、二十八星瓢虫 *Henosepilachna vigintioctopunctata*、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata*、中华草蛉 *Chrysoperla sinica*、草间小黑蛛 *Hylyplantes graminicola*。不同强度电磁场处理对辣椒田间天敌种群数量影响的结果显示，0、2 和 10 kV/m 3 种电磁场处理组对辣

椒田间食蚜蝇和二十八星瓢虫种群数量无显著影响（$P>0.05$）。0 kV/m 强度电磁场处理组七星瓢虫种群数量显著低于 2 kV/m 和 10 kV/m 处理组（$P<0.05$）。10 kV/m 强度电磁场处理组中华草蛉种群数量显著高于 0 kV/m 和 2 kV/m 强度电磁场处理组（$P<0.05$）。草间小黑蛛种群数量在 10 kV/m 强度电磁场处理组显著高于 0 kV/m 和 2 kV/m 处理组（$P<0.05$）（表 2）。

表 2　不同强度电磁场处理对辣椒田间天敌种群数量的影响

Table 2　Effect of different electromagnetic field treatments on the natural enemies of pepper plants

种类 Species	天敌数量（只/m^2）Numbers of natural enemies (ind./m^2)		
	0 kV/m	2 kV/m	10 kV/m
食蚜蝇 Syrphidae	0.205 1±0.102 6a	0.239 3±0.059 2a	0.307 7±0.102 6a
二十八星瓢虫 *Henosepilachna vigintioctopunctata*	0.068 4±0.059 2a	0.034 2±0.059 2a	0.068 4±0.059 2a
七星瓢虫 *Coccinella septempunctata*	0.136 8±0.059 2b	0.203 5±0.118 4a	0.239 3±0.118 4a
中华草蛉 *Chrysoperla sinica*	0.112 6±0.102 6b	0.136 8±0.118 4b	0.239 3±0.118 4a
草间小黑蛛 *Hylyplantes graminicola*	0.136 8±0.059 2b	0.102 6±0.026 1b	0.307 7±0.102 6a

3　讨论

特高压输变电工程已成为国家重点建设领域，但其输电线路和变电站所产生的电磁场对生态环境和生物是否会带来影响成为人们非常关注和争论的焦点问题。因此，输变电工程中产生的磁场对环境生物（如动植物）的影响研究已经成为输变电工程电路径选择急需解决的问题。如极低频电磁场曝露处理后莴苣在发芽率、幼苗的生根能力、根长、茎粗方面都有一定程度的加强（Reina *et al.*，2001）。进一步研究发现，低频电磁场持续曝露对于黄瓜整个生长时期都会产生影响，其中包括茎粗、单株叶片数、鲜重、干重、开花数等重要农艺性状（Hirota *et al.*，1999）。如经过低频电磁场处理后的西红柿种子发芽后，植株在叶面积与叶片干重方面都表现出明显的增加（De *et al.*，2006）。本研究结果表明不同电磁场处理对辣椒株高无显著影响，随着辣椒在电磁场曝露时间的延长，3 种强度电磁场处理下辣椒的株高、总功能叶片数以及茎粗都是呈现出逐渐增长的趋势。5 月份 3 种电磁场处理对辣椒叶绿素含量无显著影响，随着辣椒在电磁场曝露时间（6 月份）的延长，电磁场 10 kV/m 强度处理组叶绿素含量显著低于 0 kV/m 和 2 kV/m 强度处理组的，推断 10 kV/m 强度电磁场的处理组对辣椒叶片组织内叶绿素含量有一定的抑制作用。而电磁场持续曝露可增强植物的抗氧化能力，在一定程度上增强了植物的抗逆性（袁风华和郭静成，1992）。蔡素雯等（1996）研究发现，玉米种子在一定磁场处理下，幼叶期酶活性均增加，但脂质过氧化物和丙二酸含量均有所降低，认为磁处理在一定程度上消弱了玉米幼苗的脂质过氧化作用。本研究结果显示，3 种电磁场处理对辣椒幼苗期 POD、SOD 以及开花期叶片 POD 活力无显著影响，而 2 kV/m 强度电磁场处理组在辣椒结实期 POD 活力显著低于 10 kV/m 处理组，SOD 含量显著低于 0 kV/m 和 10 kV/m 强度电磁场处理组；0 kV/m 处理组在辣椒开花期叶片 SOD 活力显著低于 2 kV/m 与 10 kV/m 强度电磁场处理组、CAT 活力在辣椒结实期显著高于 2 kV/m 和 10 kV/m 强度电磁场处理组。2 kV/m 与 10 kV/m 曝露处理下辣椒花期 POD 和 SOD 活力显著高于 0 kV/m 处理组，辣椒结实期 10 kV/m 处理组 POD 和 SOD 活力显著高于 2 kV/m 处理组，说明短期电磁场曝露对辣椒保护酶 POD 和 SOD 活力影响较小，随着辣椒在电磁场曝露时间的延长，10 kV/m 处理组 POD 和 SOD 活力显著增加，表明 10 kV/m 处理下辣椒可增加叶片组织内的保护酶 POD 和 SOD 活力，从而提高自身对电磁场曝露的抗逆响应。

不同电磁场强度对辣椒田间不同种类害虫和天敌的种群数量存在着影响，本研究结果表明

3 种电磁场处理对辣椒田间害虫条蜂缘蝽和中黑盲蝽种群数量无显著影响（P>0.05）。此结果表明，不同电场强度对半翅目条蜂缘蝽和中黑盲蝽种群数量影响较小，这可能是因为条蜂缘蝽和中黑盲蝽个体体型较大有关。而随着电磁场强度的增加，10 kV/m 电磁场强度下黄守瓜、瓜蓟马和瓜蚜种群数量显著低于 2 kV/m 电磁场处理组（P<0.05），这主要可能是因为黄守瓜、瓜蓟马和瓜蚜个体体型较小，其生长发育和种群容易受电磁场辐射有关，后期研究需开展不同电磁场强度对辣椒田间害虫生理代谢酶活性相关研究。而不同电磁场强度对辣椒田间天敌种群数量结果表明，3 种电磁场处理组对辣椒田间食蚜蝇和二十八星瓢虫种群数量无显著影响，随着电磁场强度的增加，10 kV/m 电磁场处理组中华草蛉和草间小黑蛛种群数量显著高于 0 kV/m 和 2 kV/m 处理组，说明不同电场强度对辣椒田间天敌种群的数量因不同的种类而存在差异。总体而言随着电磁场强度的增加，对辣椒田间害虫黄守瓜、瓜蓟马和瓜蚜种群数量有一定的抑制作用，而对天敌中华草蛉和草间小黑蛛种群数量有一定的促进作用。

综上所述，不同电磁场处理对辣椒生长发育及生理生化物质在不同时期的影响存在差异，如 2 kV/m 处理组对辣椒株高、总功能叶数较对照 0 kV/m 电磁场有促进作用，而随着电磁场强度的增加，10 kV 处理组对辣椒株高、叶绿素和总功能叶数有一定的抑制作用。而短期电磁场曝露对辣椒苗期保护酶 POD 和 SOD 活力影响较小，随着辣椒在电磁场曝露时间的延长，10 kV/m 处理组对辣椒结实期保护酶 POD 和 SOD 活力显著增加。同时，随着电磁场强度的增加，对辣椒田间部分害虫如黄守瓜、瓜蓟马等种群数量有一定的抑制作用，而对天敌中华草蛉和草间小黑蛛种群数量有显著的促进作用。但本文仅对辣椒全年的生育期开展相关研究，研究跨度较短，建议后期对不同强度电磁场曝露辣椒生长发育及节肢动物种群的进行连续多年的监测，在害虫的物理防治上提供可借鉴的指导，为国家电网中国电力科学研究院对输变电工程电磁辐射的预防及管理提供实践指导。

参考文献 (References)

Cai SW, Yang J, Zhang HM, Li Y, 1996. Effects of magnetic treatment on free radical scavenging system in maize seedlings. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 16(2): 184–188. [蔡素雯, 杨军, 张红梅, 李琰, 1996. 磁处理对玉米幼苗自由基清除系统的影响. 西北植物学报, 16(2): 184–188.]

Chen JZ, 2016. Physiological effects of high voltage electric field on millet seedling. Doctoral dissertation. Shanxi: Shanxi Agricultural University. [陈建中, 2016. 高压电场处理对谷子幼苗生理效应研究. 博士学位论文. 山西: 山西农业大学.]

Chen QG, 2012. The effect of magnetic field strength treatment on the stress resistance of *Pinus sylvestris* and Changbai larch. Master dissertation. Harbin: Northeast Agricultural University. [陈全光, 2012. 磁场强度处理对樟子松和长白落叶松抗逆性的影响. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学.]

Cucurachi S, Tamis WLM, Vijver MG, Peijnenburgab WJGM, Bolteb JFB, de Snooa GR, 2013. A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environment International*, 51(5): 116–140.

De SA, Garcí D, Sueiro L, Gilart F, Licea L, 2006. Pre-sowing magnetic treatments of tomato seeds increase the growth and yield of plants. *Bioelectromagnetics*, 27(4): 247–257.

Dong ZK, Ge F, 2013. Effects of magnetic field on the development and reproduction of cotton bollworm *Helicoverpa armiger* Hubner (Lepidoptera: Noctuidae). *Chinese Journal of Ecology*, 32(5): 1265–1268. [董兆克, 戈峰, 2013. 磁场对棉铃虫生长发育及繁殖的影响. 生态学杂志, 32(5): 1265–1268.]

Favre D, 2011. Mobile phone-induced honeybee worker piping. *Apidologie*, 42(3): 270–279.

Gu NF, 1986. Development of UHV transmission technology in various countries and the impact of electric field on biology. *North China Electric Power Technology*, (1): 29–30. [顾南峰, 1986. 各国特高压输电技术的开发和电场对生物的影响. 华北电力技术, (1): 29–30.]

Halgamuge MN, See KY, Eberhardt JL, 2015. Reduced growth of soybean seedlings after exposure to weak microwave radiation from GSM 900 mobile phone and base station. *Bioelectromagnetics*, 36(2): 87–95.

Hirota N, Nakagawa J, Kitazawa K, 1999. Effects of a magnetic field on the germination of plants. *Journal of Applied Physics*, 85(8): 5717–5719.

Hu BX, 2006. Research on electromagnetic environment of ultra-high voltage and ultra-high voltage transmission lines. Master

dissertation. Hangzhou: Zhejiang University. [胡白雪, 2006. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学.]

Knight H, 1999. Calcium signaling during abiotic stress in plants. *International Review of Cytology*, 195: 269–324.

Lai JS, Zhang YM, Liu XF, Zhang JG, Ruan GC, Chen SD, Wang C, Wen D, 2015. Effects of extremely low frequency electromagnetic fields (100μT) on behaviors in rats. *Neuro Toxicology*, 52(10): 104–113.

Mahdavi SM, Sahraei H, Rezaeitavirani M, Abedi AN, 2017. Common behaviors alterations after extremely low-frequency electromagnetic field exposure in rat animal model. *Electromagnetic Biology & Medicine*, 35(3): 222–227.

Mao WQ, Liu HY, Xu H, Huang WW, 2004. Discussion on environmental impact of UHV power transmission. *Electric Power Construction*, 25(8): 54–56. [毛文奇, 刘海燕, 徐华, 黄文武, 2004. 特高压输电对环境影响的讨论. 电力建设, 25(8): 54–56.]

Panagopoulos DJ, Margaritis LH, 2010. The effect of exposure duration on the biological activity of mobile telephony radiation. *Mutat. Res.*, 699(1/2): 17–22.

Reina FG, Pascual LA, 2001. Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part I: Theoretical considerations. *Bioelectromagnetics*, 22(8): 589–595.

Reina FG, Pascual LA, Fundora IA, 2001. Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part II: Experimental results. *Bioelectromagnetics*, 22(8): 596–602.

Singh HP, Sharma VP, Batish DR, Kohli RK, 2012. Cell phone electromagnetic field radiations affect rhizogenesis through impairment of biochemical processes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(4): 1813–1821.

Shao H, Nie JY, 2009. Electromagnetic radiation and environmental impact assessment of high voltage power transmission and tansformation project. *Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology*, 23(4): 329–333. [邵红, 聂佳妍, 2009. 高压输变电工程的电磁辐射及其环境影响评价. 沈阳化工学院学报, 23(4): 329–333.]

Wang WH, Zhang L, Cheng YX, Pan WD, Jiang XF, 2018. Effect of magnetic fields on the orientation behavior of the oriental armyworm *Mythimna separata* (Walker). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 794–801. [王伟弘, 张蕾, 程云霞, 潘卫东, 江幸福, 2018. 粘虫飞行定向行为与不同磁场环境的关系. 应用昆虫学报, 55(5): 794–801.]

Xiao DH, 2014. Effects of electric field exposure on physiology of rapeseed and arthropod population in rape field. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [肖敦煌, 2014. 电场曝露对油菜生理及油菜田节肢动物种群的影响. 硕士学位论文. 武汉：华中农业大学.]

Yuan FH, Guo JC, 1992. Effects of specific electromagnetic wave (TDP) on superoxide dismutase in plants. *Journal of Beijing Agricultural University*, 18(1): 33–36. [袁风华, 郭静成, 1992. 特定电磁波(TDP)对植物超氧物歧化酶的影响. 北京农业大学学报, 18(1): 33–36.]

Zhao G, Yang GJ, Li XQ, 2007. Discussion on electromagnetic impact and environmental impact assessment of power transmission and transformation projects. *Electric Power Environmental Protection*, 23(4): 16–19. [赵刚, 杨光俊, 李晓琴, 2007. 输变电工程电磁影响及其环境影响评价问题的探讨. 电力环境保护, 23(4): 16–19.]

Zhou NN, Kang XP, He Z, Wang Y, 2018. Effects of space electric field on vegetable growth and nutrient composition. *Northern Horticulture*, (3): 73–77. [周娜娜, 康小平, 何仲, 王燕, 2018. 空间电场对蔬菜生长及营养成分的影响. 北方园艺, (3): 73–77.]