

徐 笠,陆安祥,王纪华. 温度变化对重金属植物有效性影响的研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):26-30.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.10.006

温度变化对重金属植物有效性影响的研究进展

徐 笠,陆安祥,王纪华

(北京农业质量标准与检测技术研究中心/农产品产地环境监测北京市重点实验室,北京 100097)

摘要:近年来,全球气候变化及重金属污染研究一直是植物生态学研究领域的热点。温度变化一方面通过改变植物的生长和发育、细胞膜的流动性、细胞膜上重金属运输载体的数量和种类来影响重金属的植物有效性,另一方面通过改变环境介质中重金属的赋存形态和分布规律,进而影响重金属的植物有效性。国际标准化组织和美国国家研究委员会定义植物有效性是个动态过程,即环境有效性、环境植物有效性、毒理植物有效性。关于重金属的植物有效性,国内外已经开展了大量的研究。本文综述了温度变化影响重金属植物有效性的研究进展,并展望了今后研究方向。

关键词:重金属;温度;植物有效性;蛋白组学

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)09-0026-05

近年来,由于温室气体排放导致的全球温度升高,引起了人们的广泛关注。据 IPCC 第 5 次评估报告,从 1880 年到 2012 年,全球地表平均温度大约升高了 0.85 °C^[1]。最近 60 年中我国气温上升尤其明显,平均每 10 年升高约 0.23 °C,几乎是全球升高速率的 2 倍^[2]。除此之外,生态环境破坏导致异常气候^[3]、设施农业建设导致农田生态系统气候发生变化时有出现^[4],上述诸因素均可造成自然界小区域或者大范围

的温度发生显著变化^[5]。

温度作为生物机能的一种动力,影响植物的蒸腾、水势、吸收、新陈代谢,以及几乎所有的酶促反应、休眠和生长发育^[6-7]。Lafta 等研究发现,高温处理下马铃薯叶片中葡萄糖含量的变化很小,而蔗糖含量升高,淀粉含量减少^[8]。Hood 等研究了 5 种温度(8、15、22、29、35 °C)条件下,金鱼草(*Antirrhinum majus* L.)对土壤中营养元素的吸收情况,结果表明,铜和铅的吸收情况与温度变化没有关系,而氮、磷、钾、钙和铁等元素在 22 °C 下吸收量最大^[9]。Hashimoto 等研究了胁迫下水稻的蛋白质表达变化,结果表明,水稻叶片中与能量代谢有关的蛋白质含量上调,与防御有关的蛋白含量下调^[10]。生长于自然界的植物在应对上述种种因素带来的温度变化的同时,还会受到各种污染物如重金属的胁迫^[11]。近年来,由于人口的快速增长和工业的迅速发展,大量的重金属

收稿日期:2015-08-20

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(编号:201403014-04)。

作者简介:徐 笠(1984—),男,安徽宣城人,博士,助理研究员,从事重金属生物有效性及毒理效应研究。E-mail: xuliforever@163.com。

[38]周雪飞,陈家斌,周世兵,等. 污水处理系统中三氯生固相萃取(SPE)-气相色谱(GC)-电子俘获检测器(ECD)测定方法的建立和优化[J]. 环境化学,2011,30(2):506-510.

[39]贾妍艳,谭建华,徐 晨,等. 固相萃取-气相色谱-质谱法同时测定水中 9 种药品及个人护理用品[J]. 色谱,2014(3):263-267.

[40]Canosa P, Rodriguez I, Rubí E, et al. Optimization of solid-phase microextraction conditions for the determination of triclosan and possible related compounds in water samples[J]. Journal of Chromatography A, 2005, 1072(1):107-115.

[41]伍筱琳,刘 沿,姚子伟,关道明. 气相色谱-质谱联用测定环境样品中三氯生[J]. 分析试验室,2009,28(1):26-29.

[42]王成云,钟声扬,李泳涛,等. 分光光度法快速测定纺织品中的三氯生[J]. 光谱实验室,2011,28(3):1097-1100.

[43]陆慧慧,陶冠红. 分光光度法测定日化品中的三氯生[J]. 光谱实验室,2009,26(3):487-490.

[44]Cabaleiro N, Pena P F, de la Calle I, et al. Determination of triclosan by cuvetteless UV-vis micro-spectrophotometry following simultaneous ultrasound assisted emulsification-microextraction with derivatization; use of a micellar-ionic liquid as extractant [J]. Microchemical Journal, 2011, 99(2):246-251.

[45]Brun E M, Emilio B, Rosa P, et al. Selective enzyme-linked immu-

nosorbent assay for triclosan: Application to wastewater treatment plant effluents[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(5):1665-1672.

[46]Yang J, Peng W, Zhang X. Electrochemical sensor for rapid detection of triclosan using a multiwall carbon nanotube film[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2009, 57(20):9403-9407.

[47]刘 瑛,宋启军. 三氯生分子印迹传感器的制备及其性能研究[J]. 分析试验室,2009,28(8):107-109.

[48]Atar N, Eren T, Yola M L, et al. A sensitive molecular imprinted surface plasmon resonance nanosensor for selective determination of trace triclosan in wastewater [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 216:638-644.

[49]Ramaswamy B R, Shanmugam G, Velu G, et al. GC-MS analysis and ecotoxicological risk assessment of triclosan, carbamazepine and parabens in Indian rivers[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2/3):1586-1593.

[50]Morales S, Canosa P, Rodríguez I, et al. Microwave assisted extraction followed by gas chromatography with tandem mass spectrometry for the determination of triclosan and two related chlorophenols in sludge and sediments[J]. Journal of Chromatography A, 2005, 1082(2):128-135.

通过各种途径进入到环境中。据统计,在过去的50年里,全球排放到环境中的镉、锌、铅、铜分别达2.2、13.5、78.3、93.9万t^[12]。关于重金属的植物有效性,国内外已经开展了大量的研究^[13-16]。温度变化会对重金属植物有效性产生什么影响?影响程度如何?下一步的研究方向又有哪些呢?根据国际标准化组织和美国国家研究委员会对植物有效性的界定,植物有效性是个动态过程,可分3步来进行描述,即污染物在环境介质中的有效性(即环境有效性)、污染物被植物吸收(即环境植物有效性)、污染物在植物体内的积累和效应(即毒理植物有效性)^[17-19]。针对上述3个层次,本文归纳总结了温度变化影响重金属植物有效性的研究进展及结果。

1 温度影响重金属的环境有效性

温度作为一个重要的环境因子,可以通过影响土壤固-液相表面反应、土壤理化性质、微生物过程等来改变土壤中重金属的形态与分布,从而影响重金属在土壤中的环境行为及其植物有效性。Mehadi研究了不同温度条件下土壤对Ni⁺的吸附速率和吸附总量,发现温度升高会增加土壤对Ni⁺的吸收总量,35℃时Ni⁺的吸收总量是15℃的2倍^[20]。王金贵等研究了不同温度下镉在典型农田土壤中的吸附动力学特征,结果表明温度升高会促进土壤对镉的吸附速率和吸附量^[21]。Li等发现,当温度从25℃增加到40℃时,镉在棕壤和黑土2种土壤上的解吸作用降低^[22]。党秀丽等等研究表明,当镉的外源添加量为10 mg/kg时,10、30℃条件下土壤中的镉以交换态为主,-30℃条件下土壤中的镉以残渣态为主^[23]。Toosi等发现,温带森林土壤温度与土壤中的溶解性有机碳(DOC)含量以及可溶性有机质腐殖化率紧密相关,当土壤温度从5℃增加到24℃时,表层(0~20 cm)土壤DOC含量增加86%,亚表层(20~40 cm)土壤DOC含量增加12%^[24]。Marschner等研究了灭菌和未灭菌2种条件下,不同温度(5、20、35℃)对土壤中DOC含量和性质的影响,结果表明灭菌条件下,DOC含量几乎不受温度的影响;而未灭菌

条件下,DOC含量随温度升高而显著降低,这就说明微生物在温度对土壤DOC含量的影响过程中起关键作用,同时也进一步影响了DOC含量与镉含量之间的相互作用^[25]。Cornu等研究了3种温度(10、20、30℃)条件下2种镉污染农田土壤pH值、DOC含量、NO₃⁻含量和离子强度的变化情况,发现培养14 d时,30℃处理下土壤pH值、DOC含量显著高于10、20℃处理,而NO₃⁻含量和离子强度却呈相反的情况^[26]。翁南燕报道,温度处理能明显改变Cu污染土壤的基本理化性质(有机质含量、土壤溶液pH值、总氮含量、主要阳离子含量等),同时造成土壤主要功能酶(蔗糖酶、脲酶、磷酸酶)活性发生变化,最终使得土壤固相Cu的结合形态以及土壤溶液中Cu的形态与分布产生显著变化^[27](表1)。

温度变化也可以通过改变水环境中重金属的含量和形态变化,从而影响其植物有效性。Devesa等把砷标准溶液在80~180℃加热15~44 min,发现砷标准溶液中砷的形态变化规律:温度为80~120℃时砷标准溶液、砷甜菜碱(AsB)、四甲基砷离子(TMA⁺)、甲基砷酸(MMA)、二甲基砷酸(DMA)、砷胆碱(AsC)、三甲基砷氧化物(TMAO)含量没有发生任何形态变化;温度达150℃以上时,AsB部分分解为TMAO,在160℃以上时,AsB部分分解为TMA⁺;150~180℃时,AsC有极少部分分解为TMAO(1.1%)、DMA(0.1%~0.2%);在所有温度条件下,都没有发现DMA分解为MMA的情况,也未发现MMA分解为无机砷的现象^[28]。杨震等研究了4种温度(15、20、25、30℃)条件下沉积物-水系统中Cu、Cd的含量变化情况,结果表明当水温为30℃时,水中Cu、Cd的含量最高^[29](表1)。

上述研究结果表明,温度变化首先可以直接影响土壤对吸附速率和吸附总量,其次通过改变土壤有机质含量、土壤溶液pH值、主要阳离子含量等土壤理化性质和土壤微生物过程间接影响土壤中重金属的赋存形态,进而影响重金属的植物可利用性(表1)。

表1 温度影响重金属环境有效性的主要研究进展

介质	对象	主要结论	参考文献
土壤	Ni	温度升高会增加土壤对Ni ⁺ 的吸收总量,35℃时Ni ⁺ 的吸收总量是15℃的2倍	[20]
土壤	Cd	温度升高会促进土壤对镉的吸附速率和吸附量,且pH值是影响镉吸附速率的主要因子	[21]
土壤	Cd	当温度从25℃增加到40℃时,镉在棕壤和黑土2种土壤上的解吸作用降低	[22]
土壤	Cd	当镉的外源添加量为10 mg/kg时,10、30℃条件下土壤中的镉以交换态为主,-30℃条件下土壤中的镉以残渣态为主	[23]
土壤	溶解性DOC	当土壤温度从5℃增加到24℃时,表层(0~20 cm)土壤DOC含量增加86%,亚表层(20~40 cm)土壤DOC含量增加12%	[24]
土壤	微生物、DOC	在灭菌条件下,DOC含量几乎不受温度的影响;而在未灭菌条件下,DOC含量随温度升高而显著降低	[25]
土壤	pH值、DOC含量、NO ₃ ⁻ 含量和离子强度	培养14 d时,30℃处理下土壤pH值和DOC含量显著高于10、20℃处理,而NO ₃ ⁻ 含量和离子强度却呈相反的情况	[26]
土壤	Cu	温度处理能明显改变Cu污染土壤的基本理化性质,造成土壤主要功能酶活性发生变化,土壤固相Cu的结合形态以及土壤溶液中Cu的形态与分布产生显著变化	[27]
水	As	温度升高时,溶液中As的不同形态之间会发生变化	[28]
水	Cu、Cd	水温为30℃时,水中Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 含量最高	[29]

2 温度影响重金属的环境植物有效性

温度变化可以改变植物的生长发育、细胞膜的流动性、细

胞膜上重金属运输载体的数量和种类,从而影响重金属的环境植物有效性^[25,30]。部分研究结果表明,温度升高会促进植物对重金属的吸收。Davies等测定了英国Shipham的铅锌矿

区地区冬天蔬菜中的镉含量,为 0.02 ~ 1.77 mg/kg (平均 0.23 mg/kg),而夏天蔬菜中的镉含量为 0.01 ~ 3.56 mg/kg (平均 0.52 mg/kg),平均值高出冬天的 1 倍以上^[31]。Fritioff 等发现,沉水植物对 Cu、Zn、Cd 的积累随温度的升高而显著增加^[16]。Yu 等通过水培试验研究了温度变化对杂交柳 (*Salix matsudana* Koidz × *alba* L.) 吸收 Cr(VI)、Cr(III) 的影响,结果表明杂交柳吸收 Cr(VI)、Cr(III) 的量随着温度升高而升高,同一温度同一浓度下杂交柳对 Cr(III) 吸收速率大于对 Cr(VI) 的吸收速率^[32]。Sardans 等研究发现,温度升高增加了灌木 *Erica multiflora* 中 Al、As、Cr、Pb、Ca、Mo 含量, *Dorycnium pentaphyllum* 中 Ca、Mo 的含量和 *Globularia alypum* 中 Al、Sb、Zn、Fe 的含量^[33-34]。Li 等研究结果表明,温度升高增加马铃薯叶中 Cu、Zn、Fe 的含量^[35]。温度升高促进植物对重金属的吸收的一个重要原因就是温度升高促使植物的蒸腾作用加强。高茜蕾等的研究表明,几种不同品种的油菜地上部镉的含量及镉的吸收总量与蒸腾速率存在明显的正相关关系,即蒸腾作用越强,镉的吸收越多^[36]。张永志等研究了不同蒸腾作用下番茄幼苗对 Cd 的吸收富集规律,结果表明,高

蒸腾作用下番茄幼苗 Cd 含量比低蒸腾作用下增加了 1.47 ~ 1.73 倍^[37] (表 2)。

然而另有一些研究则发现,温度升高并不会增加植物中重金属的含量。Li 等研究了温度变化对马铃薯中重金属积累的影响,结果表明温度升高 3 °C,马铃薯块茎中的 Cd、Pb、Fe、Zn、Cu 含量分别下降 27%、55%、41%、29%、23%^[35]。Pourghasemian 等研究了温度变化对 8 种基因型红花镉吸收的影响,结果表明,其中 1 种基因型红花 (AC - sterling) 的根和地上部分的镉含量并没有随着温度的升高而升高^[38]。Kopittke 等测定了毛叶山樱花等 6 种牧草在春夏秋 3 季中镉含量的变化,结果表明,牧草中镉含量夏天比春天的平均值低 47%,而秋天的比夏天的增加 29%^[14]。其中不同牧草的变化也不尽相同,如夏天毛叶山樱花叶片比春天降低 32%,秋天比夏天又降低 26%,但欧洲花楸 (*Sorbus aucuparia*) 的叶片,虽然春天的比夏天低 42%,但秋天的比夏天的高 53%。李丹丹等研究了温度预暴露对小麦吸收镉的影响,结果表明,经过 37 °C 高温预暴露 4 h 后,小麦根部和地上部分的镉含量减少了约 40%,说明高温预暴露能减少小麦对 Cd 的吸收^[40] (表 2)。

表 2 温度影响重金属的环境植物有效性的主要研究进展

重金属	植物种类	主要结论	参考文献
Cd	蔬菜	夏天蔬菜中的镉平均值高出冬天的 1 倍以上	[31]
Cu、Zn、Cd	沉水植物 (<i>Potamogeton</i> 和 <i>Elodea</i>)	沉水植物中 Cu、Zn、Cd 的含量随温度的升高而显著增加	[16]
Cr	水柳	杂交柳吸收 Cr(VI)、Cr(III) 的量随着温度升高而升高,对 Cr(III) 吸收速率要大于对 Cr(VI) 的吸收速率	[32]
Al、As、Cr、Pb、Zn、Sb	灌木 (<i>E. multiflora</i> 、 <i>G. alypum</i>)	温度升高能增加 <i>E. multiflora</i> 中 Al、As、Cr、Pb 的含量 <i>G. alypum</i> 中 Al、Sb、Zn 的含量	[34]
Ca、Mo、Fe	灌木 (<i>E. multiflora</i> 、 <i>G. alypum</i> 、 <i>D. pentaphyllum</i>)	温度升高增加了 <i>E. multiflora</i> 、 <i>D. pentaphyllum</i> 中 Ca、Mo 的含量以及 <i>G. alypum</i> 中 Fe 的含量	[33]
Cd	油菜	油菜地上部镉的含量及镉的吸收总量与蒸腾速率存在明显的正相关关系	[36]
Cd、Pb	番茄幼苗	高蒸腾作用下番茄幼苗 Cd、Pb 含量分别比低蒸腾作用下增加 1.47 ~ 1.73、1.25 ~ 1.75 倍	[37]
Cd、Pb、Fe、Zn、Cu	马铃薯	温度升高增加了马铃薯叶中 Cu、Zn、Fe 的含量,降低了马铃薯块茎中的 Cd、Pb、Fe、Zn、Cu 含量	[35]
Cd	红花	1 种基因型红花的根和地上部分的镉含量并没有随着温度的升高而升高	[38]
Cd	牧草	总体上,夏天的比春天的降低 47%,而秋天的比夏天的增加 29%	[14]
Cd	小麦	经过 37 °C 高温预暴露 4 h 后,小麦根部和地上部分的镉含量减少约 40%	[39]

总体而言,温度升高促进植物吸收重金属的研究结果占据主导地位。温度升高必然增加植物的蒸腾作用,从而促进植物对重金属的吸收,但是温度升高同样也会导致植物的生物量增大,从而稀释植物不同器官中的重金属含量。因此,温度升高到底是增加还是降低植物器官中的重金属含量,决定于“促进”和“稀释”哪个过程占据着主导作用。温度升高对重金属的环境植物有效性会因不同物种以及不同基因型物种的生物学特征的不同,从而表现出不同的结果。

3 温度影响重金属的毒理植物有效性

温度变化会影响植物的生长发育、新陈代谢速率,蛋白质等物质的合成以及重金属在植物体内的亚细胞分布,从而影响重金属毒理植物的有效性^[27,40]。一些学者研究了温度变化对 Cd 胁迫下植物毒理效应的影响。Oncel 等发现,随着温

度升高,重金属对小麦的毒性作用增加,会导致植物体内叶绿素含量降低以及自由脯氨酸大量累积^[41]。Baghour 等研究了 16、20、23、27、30 °C 处理下,Cd、Pb 胁迫对马铃薯生理效应的影响,结果表明当处理温度为 27 °C 时,马铃薯中过氧化物酶、过氧化氢酶的活性最高;当处理温度为 20 °C 时,马铃薯中色素含量最低^[42]。Wang 等研究了温度变化对 Cd 胁迫下海洋硅藻的生化机制的影响,结果表明,较高的温度会影响藻类的生长、光合作用、植物络合素的合成,使得硅藻对 Cd 的敏感性增加,表现为氮素缺乏、谷胱甘肽的消耗量增加,碳氮比例失调以及植物螯合肽和其他硫醇的产生^[15]。Li 等研究了温度变化对 Cd 胁迫下小麦幼苗根的生态毒理效应,结果表明,Cd 污染对小麦根伸长抑制的 EC₅₀ 值随温度升高而降低;温度改变了 Cd 在小麦根中亚细胞分布的比例,温度越高,Cd 在热稳定蛋白部分的比例越高;不同温度条件下,随 Cd 浓度升

高, CAT 酶活性的变化规律显著不同^[43]。Zeng 等研究发现, 随着 Zn 浓度的升高, 30 °C 高温处理下的蓝藻细胞生长速率和光合作用会受到明显的抑制^[44]。翁南燕研究结果表明, 在 Cu/Cd 复合胁迫下, 温度升高促进了小麦根对铁的吸收, 抑制了根对锰和锌的吸收; 而小麦叶片中铁、锰和锌的含量随温度变化而变化不是很明显^[27]。Sergeant 等研究了 Cd 和低温共同作用下, 白杨木树叶在蛋白质组学方面的变化, 结果表明, Cd 和低温共同作用于白杨木树叶的醌醇解、柠檬酸循环、伴侣蛋白和二硫化物异构酶的形成等方面^[13](表 3)。

综上所述, 目前关于温度影响重金属的毒理植物有效性的研究主要集中于重金属 Cd, 研究其他金属毒害作用的较少。对于植物来说, 在植物的耐受范围内, 温度本身不会对植物产生任何毒害效应, 而是通过改变植物的重金属吸收量以及重金属在植物体内的分布、代谢方式来影响重金属对植物的毒害效应。如果超过了植物的耐受范围, 温度本身不仅会对植物产生危害, 而且会与重金属的毒害产生耦合反应, 但是联合、协同还是拮抗, 目前尚无结论, 需要进一步研究。

表 3 温度影响重金属的毒理植物有效性的相关文献

重金属	植物种类	主要结论	参考文献
Cd	小麦	小麦体内出现叶绿素含量的降低以及自由脯氨酸的大量累积等症状	[39]
Cd	马铃薯	当处理温度为 27 °C 时, 马铃薯中过氧化物酶和过氧化氢酶的活性最高; 当处理温度为 20 °C 时, 马铃薯中色素含量最低	[42]
Cd	海洋硅藻	较高的温度使得硅藻对 Cd 的敏感性增强, 表现为氮素缺乏, 谷胱甘肽的消耗量增加, 碳氮比例失调以及植物螯合肽和其他硫醇的产生	[15]
Cd	小麦	Cd 污染对小麦根伸长抑制的 EC ₅₀ 值随温度升高而降低; 温度改变了 Cd 在小麦根中亚细胞分布的比例	[43]
Zn	蓝藻	30 °C 高温处理下的蓝藻细胞生长速率和光合作用会受到明显的抑制	[44]
Cu、Cd	小麦	温度升高促进了小麦根对铁的吸收, 抑制了根对锰和锌的吸收; 而小麦叶片中铁、锰和锌的含量随温度变化而变化不是很明显	[27]
Cd	白杨木树叶	Cd 和低温共同作用于白杨木树叶的醌醇解、柠檬酸循环、伴侣蛋白和二硫化物异构酶的形成等方面	[13]

4 结语与展望

上述研究表明, 温度变化通过直接改变土壤对重金属的吸附速率和吸附总量, 或间接改变土壤理化性质和土壤微生物过程间接影响重金属的植物可利用性。温度升高是增加还是降低植物器官中的重金属含量, 决定于促进和稀释哪个过程占据着主导作用。温度升高对重金属的环境植物有效性会因不同物种以及不同基因型物种的生物学特征而不同。目前关于温度影响重金属的毒理植物有效性主要集中于重金属 Cd 的研究。在植物的耐受范围内, 温度通过改变植物的重金属吸收量以及重金属在植物体内的分布和代谢方式来影响重金属对植物的毒害效应。超过了植物的耐受范围, 温度本身不仅会对植物产生危害, 而且会与重金属的毒害产生耦合反应。

温度变化可以影响重金属的植物有效性, 但是仅限于目前的研究还不够, 笔者认为可以在以下几个方面进一步加强研究: (1) 从分子机理层面上加强研究。已有的研究大都从植物生理生态等方面开展, 然而生物体内真正执行生理功能的是蛋白质, 且执行功能时的蛋白质表达是多样的、动态的, 因此要想全面和深入地认识温度变化对重金属植物有效性的影响, 必然要从蛋白质表达层面上进行研究。(2) 加强其他气候因素与温度变化耦合作用对重金属植物有效性的影响研究。植物生长于一个多因素的复杂环境, 要考虑其他气候因素, 比如干旱、二氧化碳浓度升高等对植物的影响。(3) 加强植物全生育期的研究, 目前的研究结果都是基于植物的幼苗期阶段, 然而以植物全生育期作为研究目标, 研究温度变化对植物有效性的影响, 更能反映实际的情况, 更具有实际的意义。(4) 加强温度变化对其他重金属(砷、汞、铅等)生物有效性影响方面的研究。(5) 加强新技术和新方法在重金属生物有效性方面的应用, 如同步辐射技术、核磁共振技术等。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013; the physical science [M]. Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 秦大河, 周波涛, 效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响 [J]. 气象学报, 2014, 72(5): 869 - 879.
- [3] Rajkumar M, Prasad M N, Swaminathan S, et al. Climate change driven plant - metal - microbe interactions [J]. Environment International, 2013, 53: 74 - 86.
- [4] Yang L, Huang B, Hu W, et al. The impact of greenhouse vegetable farming duration and soil types on phytoavailability of heavy metals and their health risk in eastern China [J]. Chemosphere, 2014, 103: 121 - 130.
- [5] Bahuguna R N, Jagadish K V. Temperature regulation of plant phenological development [J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 111: 83 - 90.
- [6] Michaletz S T, Cheng D L, Kerkhoff A J, et al. Convergence of terrestrial plant production across global climate gradients [J]. Nature, 2014, 512(7512): 39 - 43.
- [7] Mahan J R, McMichael B L, Wanjura D F. Methods for reducing the adverse effects of temperature stress on plants; a review [J]. Environmental and Experimental Botany, 1995, 35(3): 251 - 258.
- [8] Lafta A M, Lorenzen J H. Effect of high temperature on plant growth and carbohydrate metabolism in potato [J]. Plant Physiology, 1995, 109(2): 637 - 643.
- [9] Hood T M, Mills H A. Root - zone temperature affects nutrient - uptake and growth of snapdragon [J]. Journal of Plant Nutrition, 1994, 17(2/3): 279 - 291.
- [10] Hashimoto M, Komatsu S. Proteomic analysis of rice seedlings during cold stress [J]. Proteomics, 2007, 7(8): 1293 - 1302.

- [11] Mclaughlin M J, Singh B R. Cadmium in soils and plants [M]. Netherlands; Springer Netherlands, 1999.
- [12] 孙铁珩, 李培军, 周启星. 土壤污染形成机理与修复技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [13] Sergeant K, Kieffer P, Dommes J, et al. Proteomic changes in leaves of poplar exposed to both cadmium and low - temperature [J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 106: 112 - 23.
- [14] Kopittke P M, Blamey F P, Menzies N W. Toxicity of Cd to signal grass (*Brachiaria decumbens* Stapf.) and Rhodes grass (*Chloris gayana* Kunth.) [J]. Plant and Soil, 2010, 330(1/2): 515 - 523.
- [15] Wang M J, Wang W X. Temperature - dependent sensitivity of a marine diatom to cadmium stress explained by subcellular distribution and thiol synthesis [J]. Environmental science & technology, 2008, 42(22): 8603 - 8608.
- [16] Fritioff A, Kautsky L, Greger M. Influence of temperature and salinity on heavy metal uptake by submersed plants [J]. Environmental Pollution, 2005, 133(2): 265 - 274.
- [17] 罗小三. 土壤(溶液)中重金属的化学形态和植物有效性及毒性研究 [D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2008.
- [18] Peijnenburg W J G M, Zablotkaja M, Vijver M G. Monitoring metals in terrestrial environments within a bioavailability framework and a focus on soil extraction [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 67(2): 163 - 179.
- [19] Bioavailability of contaminants in soils and sediments: processes, tools and applications [M]. Washington D C: The National Academies Press, 2003.
- [20] Mehadi. Reaction of Nickel with soils and goethite; equilibrium and kinetic studies [D]. University of New Hampshire, 1993.
- [21] 王金贵, 吕家珑, 张瑞龙, 等. 不同温度下镉在典型农田土壤中的吸附动力学特征 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1118 - 1123.
- [22] Li X H, Zhou Q X, Wei S H, et al. Adsorption and desorption of carbendazim and cadmium in typical soils in northeastern China as affected by temperature [J]. Geoderma, 2011, 160(3/4): 347 - 354.
- [23] 党秀丽, 陈彬, 虞娜, 等. 温度对外源性重金属镉在土 - 水界面间形态转化的影响 [J]. 生态环境, 2007, 16(3): 794 - 798.
- [24] Toosi E R, Schmidt J P, Castellano M J. Soil temperature is an important regulatory control on dissolved organic carbon supply and uptake of soil solution nitrate [J]. European Journal of Soil Biology, 2014, 61: 68 - 71.
- [25] Marschner B, Bredow A. Temperature effects on release and ecologically relevant properties of dissolved organic carbon in sterilised and biologically active soil samples [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(4): 459 - 466.
- [26] Cornu J Y, Denaix L, Schneider A, et al. Temporal variability of solution Cd²⁺ concentration in metal - contaminated soils as affected by soil temperature: consequences on lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposure [J]. Plant and Soil, 2008, 307(1/2): 51 - 65.
- [27] 翁南燕. 温度对 Cu/Cd 胁迫下小麦生理毒性响应及 Cu 污染土壤环境行为的影响 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [28] Devesa V, Martínez A, Súrner M A, et al. Kinetic study of transformations of arsenic species during heat treatment [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(5): 2267 - 2271.
- [29] 杨震, 孔莉. 温度变化时沉积物中铜、镉形态对水生生物的可给性 [J]. 中国环境科学, 1997(2): 65 - 67.
- [30] Lynch D V, Steponkus P L. Plasma - membrane lipid alterations associated with cold - acclimation of winter rye seedlings [J]. Plant Physiology, 1987, 83(4): 761 - 767.
- [31] Davies B E, Ginniver R C. Trace - metal contamination of soils and vegetables in shiphham somerset England UK [J]. Journal of Agricultural Science, 1979, 93: 753 - 756.
- [32] Yu X Z, Peng X Y, Xing L Q. Effect of temperature on phytoextraction of hexavalent and trivalent chromium by hybrid willows [J]. Ecotoxicology, 2010, 19(1): 61 - 68.
- [33] Sardans J, Peuelas J, Prieto P, et al. Changes in Ca, Fe, Mg, Mo, Na, and S content in a Mediterranean shrubland under warming and drought [J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2008, 113(G3): 564.
- [34] Sardans J, Peuelas J, Estiarte M. Warming and drought change trace element bioaccumulation patterns in a Mediterranean shrubland [J]. Chemosphere, 2008, 70(5): 874 - 885.
- [35] Li Y, Zhang Q, Wang R Y, et al. Temperature changes the dynamics of trace element accumulation in *Solanum tuberosum* L. [J]. Climatic Change, 2012, 112(3/4): 655 - 672.
- [36] 高茜蕾, 郑瑞伦, 李花粉. 蒸腾作用及根系特征对不同品种油菜吸收镉的影响 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1794 - 1798.
- [37] 张永志, 赵首萍, 徐明飞, 等. 不同蒸腾作用对番茄幼苗吸收 Pb、Cd 的影响 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 515 - 518.
- [38] Pourghasemian N, Ehsanzadeh P, Greger M. Genotypic variation in safflower (*Carthamus* spp.) cadmium accumulation and tolerance affected by temperature and cadmium levels [J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 87: 218 - 226.
- [39] 李丹丹, 周东美, 汪鹏, 等. 镉和温度预暴露对小麦吸收镉的影响 [J]. 生态毒理学报, 2010, 5(3): 439 - 445.
- [40] Ekvall L, Greger M. Effects of environmental biomass - producing factors on Cd uptake in two Swedish ecotypes of *Pinus sylvestris* [J]. Environmental Pollution, 2003, 121(3): 401 - 411.
- [41] Oncel I, Keles Y, Ustün A S. Interactive effects of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat seedlings [J]. Environmental Pollution, 2000, 107(3): 315 - 320.
- [42] Baghour M A, Villora G, Hernández J, et al. Phytoextraction of Cd and Pb and physiological effects in potato plants (*Solanum tuberosum* var. *spunta*): importance of root temperature [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(11): 5356 - 5363.
- [43] Li D D, Zhou D M, Wang P, et al. Temperature affects cadmium - induced phytotoxicity involved in subcellular cadmium distribution and oxidative stress in wheat roots [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, 74(7): 2029 - 2035.
- [44] Zeng J, Wang W X. Temperature and irradiance influences on cadmium and zinc uptake and toxicity in a freshwater cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1/2/3): 922 - 929.