

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第5期 Vol.34 No.5 **2014**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第34卷第5期 2014年3月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 干旱指标研究进展..... 李柏贞,周广胜 (1043)
- 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展..... 李堃清,吴正云,张强,等 (1053)
- 森林生态系统中植食性昆虫与寄主的互作机制、假说与证据..... 曾凡勇,孙志强 (1061)
- 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展..... 陈云峰,韩雪梅,李钰飞,等 (1072)
- 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析..... 赵良仕,孙才志,郑德凤 (1085)
- 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例..... 高云,谢苗苗,付梅臣,等 (1094)
- 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例.....  
..... 赵明月,赵文武,钟莉娜 (1105)
- 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响.....  
..... 陈旭飞,张池,戴军,等 (1114)

### 个体与基础生态

- 钾与信号抑制剂对外生菌根真菌分泌乙酸的调控作用..... 杨红军,李勇,袁玲,等 (1126)
- 砷诱导蚕豆气孔保卫细胞死亡的毒性效应..... 薛美昭,仪慧兰 (1134)
- 石油污染土壤中苯酚降解菌 ad049 的鉴定及降解特性..... 胡婷,谷洁,甄丽莎,等 (1140)
- 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究..... 付川,余顺慧,黄怡民,等 (1149)
- 播种期对晚季稻香气 2-乙酰-1-吡咯啉含量和产量的影响..... 杨晓娟,唐湘如,闻祥成,等 (1156)
- 外源钙(Ca)对毛葱耐镉(Cd)胁迫能力的影响..... 王巧玲,邹金华,刘东华,等 (1165)
- 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究..... 高明亮,官兆宁,赵文吉,等 (1178)
- 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较..... 李西,王丽华,刘尉,等 (1189)
- 恩施烟区无翅桃蚜在烤烟田空间动态的地统计学分析..... 夏鹏亮,王瑞,王昌军,等 (1198)
- 啮齿动物捕食和搬运蒙古栎种子对种群更新的影响..... 张晶虹,刘丙万 (1205)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响.....  
..... 李倩倩,赵旭,郭正刚 (1212)
- 光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的超补偿生长与竞争效应..... 谢晓玲,周蓉,邓自发 (1224)

### 种群、群落和生态系统

- 人工巢箱繁殖鸟类主要巢捕食者及其影响因素..... 张雷,李东来,马锐强,等 (1235)
- 泉州湾埕埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布..... 卓异,蔡立哲,郭涛,等 (1244)

|                                 |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| 不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响·····  | 张海萍,武大勇,王赵明,等 (1253) |
| 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子····· | 陆欣鑫,刘妍,范亚文 (1264)    |
| 江西桃红岭国家级自然保护区梅花鹿生境适宜性评价·····    | 李佳,李言阔,缪沪君,等 (1274)  |

## 景观、区域和全球生态

|                               |                      |
|-------------------------------|----------------------|
| 中国自然保护综合地理区划·····             | 郭子良,崔国发 (1284)       |
| 近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应·····  | 缪丽娟,蒋冲,何斌,等 (1295)   |
| 人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响·····        | 刘可群,梁益同,周金莲,等 (1302) |
| 2000—2010 年武汉市中心城区湖泊景观变化····· | 谈永利,王宏志,张欢,等 (1311)  |

## 资源与产业生态

|                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| 三江源区冬虫夏草资源适宜性空间分布····· | 李芬,吴志丰,徐翠,等 (1318) |
|------------------------|--------------------|

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 282 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 30 \* 2014-03



**封面图说:** 插秧季节的桂西——2009—2011 年,我国广西、云南、贵州、四川、重庆等西南地区遭受了百年不遇的特大旱灾,其中广西西北部、云南大部、贵州西部等石漠化地区最为严重,农作物大面积绝收,千百万人 and 大牲畜饮水困难,这种危害是巨大的、现实的。从对 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响结果显示:2009—2011 年西南地区年均降水量和湿润指数明显低于 1980—2008 年均值,植被净初级生产力低于 2001—2008 年均值,造成的碳损失约占我国总碳汇的 7.91%。全球气候变暖给大气环流提供了动力,也造成了许多极端灾害天气,因此如何应对气候变化形势显得更加紧迫。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201305141057

李堃清, 吴正云, 张强, 王小恒, 张季慧, 杨一鸣, 王鹤龄, 乌兰, 李裕. 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展. 生态学报, 2014, 34(5): 1053-1060.

Li L Q, Wu Z Y, Zhang Q, Wang X H, Zhang J H, Yang Y M, Wang H L, Wu L, Li Y. State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1053-1060.

## 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展

李堃清<sup>1</sup>, 吴正云<sup>1</sup>, 张 强<sup>3</sup>, 王小恒<sup>4</sup>, 张季慧<sup>2</sup>, 杨一鸣<sup>2</sup>, 王鹤龄<sup>3</sup>, 乌 兰<sup>2</sup>, 李 裕<sup>2,3,\*</sup>

(1. 四川大学轻纺与食品工程学院, 成都 610064; 2. 西北民族大学化工学院, 兰州 730030;

3. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃省气象局, 兰州 730020;

4. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

**摘要:**作物矿质元素利用率对气候变化的响应是目前全球变化研究中既重要、又复杂,且认知最少的科学领域。这个科学问题的研究关系到解密或预测陆地植物及农作物矿质胁迫对全球气候变化响应的机理,为将来农业投入提供理论依据,是应对气候变化的当务之急。目前只有少数研究,通过模拟试验,探索性地开展了 CO<sub>2</sub> 浓度或温度升高的环境条件下,矿质元素在土壤-植物系统迁移、分布和储存特征的研究。从相关的文献报道来看,CO<sub>2</sub> 浓度升高环境条件下,小麦和水稻作物籽粒中大量和痕量元素的富集水平一般呈下降趋势。但温度升高情况下,作物各器官对矿质元素的吸收情况则更为复杂。正由于气候因素与植物矿质元素利用率之间关系的复杂性,在气候变化背景下,解密作物矿质胁迫对全球气候变化响应的科学问题,尚需改进试验方法、手段,从土壤性质、作物生态生理,以及农业生态系统中矿质元素在土壤—作物系统中迁移转化的过程,全面考察作物矿质元素利用率对气候变化的响应机理。

**关键词:**气候变化;矿质胁迫;生物利用率;食品安全

## State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops

LI Longqing<sup>1</sup>, WU Zhengyun<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>3</sup>, WANG Xiaoheng<sup>4</sup>, ZHANG Jihui<sup>2</sup>, YANG Yiming<sup>2</sup>, WANG Heling<sup>3</sup>, WU Lan<sup>2</sup>, LI Yu<sup>2,3,\*</sup>

1 College of Light Industry, Textile and Food Engineering, Chengdu 610064, China

2 College of Chemical Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730030, China

3 China Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration; Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

4 College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** We critically review the current state of understanding of how bioaccumulation and bioavailability of trace elements in crops might be affected by global warming and elevated CO<sub>2</sub> concentrations, and the interaction of different environmental processes in controlling the transfer, distribution and deposition of mineral elements in crops in a changing environment. The 4<sup>th</sup> IPCC Assessment report concludes that global climate change is occurring due to human activities and will have a significant impact on the earth's natural systems. However, significant uncertainty over the likely magnitude of these changes and their impacts exists. While bioaccumulation of mineral elements in crops is recognized as a physiologically important process, and is affected by several different climate variables (e.g. temperature, CO<sub>2</sub>), we know little about how these variables interact with other climate variables affecting plant productivity (e.g. rainfall), and how mineral stresses at

**基金项目:**国家自然科学基金(41261052);国家重点基础研究发展计划项目(2013CB430200,2013CB430206);2013年西北民族大学创新团队项目资助;公益性气象行业科研专项(GYHY201106029)

收稿日期:2013-05-14; 修订日期:2013-09-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyuxbmd@126.com

the individual plant level translate to impacts at the agroecosystem level. Several studies of crop plants grown at high root temperatures found higher uptakes of zinc, lead, cadmium, silver, chromium and antimony versus plants grown at low root temperatures. Numerous studies report that elevated CO<sub>2</sub> concentrations generally decreased the accumulation of mineral elements in spring wheat and rice. However, the vast majority of past research has focused on the isolated effects of elevated CO<sub>2</sub> concentrations and temperature rise on crop productivity. We still know relatively little about the influence of temperature raising *and* elevated CO<sub>2</sub> concentrations on plant and mineral element interactions in a changing environment, making it very difficult to predict how food production will respond to future climate change. Furthermore, although we have a fairly good understanding of how mineral concentrations in plant tissue can affect herbivores, we know comparatively little about these effects influence pasture production. There is clear need to integrate our current understanding from quantitative experimental studies within process-based models of plant productivity that should include interactions among climate, mineral stress and herbivory in order to better predict the responses of crops and pastures to future global climate change.

**Key Words:** climate change; mineral stresses; bioavailability; food security

IPCC 评估报告中的气候变化是指气候系统随时间的变化(无论其原因是自然变化还是人类活动的结果),而《联合国气候变化框架公约》中,气候变化是指直接或间接归因于改变全球大气成分的人类活动所引起的气候变化<sup>[1]</sup>。IPCC 第四次评估发现最近 100 年(1906—2005 年)全球平均地表温度上

升了 0.74℃,而且过去 50 a 升温率接近过去 100 a 的 2 倍。在此背景下,科学家已经开展了全球变暖对农业季节性、土壤质量和作物产量等方面影响的研究,并取得了重要的进展<sup>[2-4]</sup>。遗憾的是,除了氮以外,对于气候变化背景下作物矿质胁迫问题目前很少有人研究(表 1)。

表 1 2012 年 12 月分别以 Elevated CO<sub>2</sub>, Global warming 和 crop, 以及作物所必需的主要矿质元素为主题在 Web of science ISI 检索的所有期刊发表文章的数量

Table 1 Database survey conducted in December 2012 (Web of Science, ISI) for journal articles dealing with elevated CO<sub>2</sub> and global warming as well as minerals of importance to crop nutrition

| 主题 Topic                           | 刊物文章数量<br>Numbers of Journal articles | 主题 Topic                | 刊物文章数量<br>Numbers of Journal articles |
|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop    | 797                                   | Global warming, crop    | 641                                   |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+N  | 266                                   | Global warming, crop+N  | 150                                   |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+P  | 26                                    | Global warming, crop+P  | 13                                    |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+K  | 6                                     | Global warming, crop+K  | 2                                     |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+Ca | 10                                    | Global warming, crop+Ca | 4                                     |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+Mg | 4                                     | Global warming, crop+Mg | 0                                     |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+Fe | 6                                     | Global warming, crop+Fe | 3                                     |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+Mn | 3                                     | Global warming, crop+Mn | 0                                     |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+Cu | 2                                     | Global warming, crop+Cu | 0                                     |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+Zn | 4                                     | Global warming, crop+Zn | 1                                     |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+B  | 2                                     | Global warming, crop+B  | 0                                     |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+Al | 2                                     | Global warming, crop+Al | 2                                     |
| Elevated CO <sub>2</sub> , crop+Si | 1                                     | Global warming, crop+Si | 1                                     |

矿质胁迫是指陆地植物生长发育过程中对营养元素的不足利用,或对非营养矿质元素(尤其是 Al, Na, Cl, Mn 和其它痕量元素)毒性的负反馈反应<sup>[5]</sup>。自然生态系统,农业耕地、林地和牧场,尤其在欠发达国家,很大程度上处于多种矿质元素胁迫状态。比如大多数陆地植被和作物受到土壤中 Ca、Zn 等营养元素缺乏胁迫,以及酸性土壤 Al 和碱性土壤 Mn

的毒性胁迫。不理解植物生长的矿物胁迫的机理,我们将无法理解或预测生态系统对全球气候变化的响应。在农业领域,虽然经过绿色革命的努力,至今人类并未从根本上解决作物痕量元素矿质胁迫问题。在气候变化背景下,更是增加了预测和解决这一问题的难度。但这一科学问题是应对未来气候变化,预测未来农业投入、粮食和食品安全问题的理论



以植物矿质胁迫问题一直是科学上尚未彻底解决的难题,复杂多变的气候影响可能是主要的原因。尽管全球变化已经加速土壤侵蚀<sup>[21-22]</sup>,减少土壤容量并加重养分的流失<sup>[23]</sup>,直接影响到植物(作物)对土壤中矿质元素的利用率。但气候变化的主要特征是全球变暖,而驱动全球变暖的主要动力是 CO<sub>2</sub> 浓度升高。因此,选择温度和 CO<sub>2</sub> 因素作为研究气候变化对植物矿质胁迫影响的突破口,才有可能从根本上解密气候变化与植物矿质元素利用率之间的关系。

### 1.1 温度升高的影响

气候变化对作物矿质元素利用率影响的理论依据,主要建立在其对土壤理化性质影响的基础上。Ehlken<sup>[20]</sup>认为,控制土壤理化性质的任何环境因子的变化,都会影响矿质元素在土壤-植物之间的迁移行为。基于这种理论,一个合理的推测认为气候变化可能引起土壤理化性质的改变,或直接影响痕量元素的生物利用率。虽然这种推测具有一定的合理性,但定量预测气候变化对作物矿质元素利用率的影响非常困难,只有少数报道支持这种推测,比如最近的研究发现,气候变化(温度升高 3℃)影响了土壤中痕量元素溶解性,使西早 1 号、2 号和 3 号小麦籽粒中 Cd 浓度相比对照组分别下降 43.4%、11.1% 和 13.4%,Cu 浓度相比对照处理分别下降了 30.4%、25.1% 和 10.8%<sup>[24]</sup>。

从植物生理方面分析,早期的研究认为温度升高改变了植物细胞离子隔膜脂类的组成<sup>[26]</sup>和细胞膜的通透性<sup>[27]</sup>,直接影响到植物对矿质元素的生物利用度,从而影响植被的生态型和作物生产力。然而,在一个正在变化的环境条件下,我们对于温度与植物矿质元素利用度之间的关系认知很少。仅有的几个研究,如 Baghour<sup>[28]</sup>和 Albrecht<sup>[29]</sup>研究发现几种植物对 Zn、Pb、Ag、Cr、Sb 和 Cd 的吸收速率随土壤温度升高而显著提高。Ekvall and Greger<sup>[30]</sup>报道温度升高引起生物量增加和水中大型植物迅速繁殖,导致植物生长速率高于其对痕量元素的吸收速率。最近,一项在地中海灌木林模拟气候变化温度升高的试验研究,也发现 1℃ 的升温处理使 1 年生灌木 *E. multiora* 叶 Cu 和 Zn 浓度分别提高了 57 和 50%,使 *G. alypum* 叶 Zn 浓度提高了 100%,但使 *E. multiora* 叶 Cd 和 Pb 浓度分别下降了 67 和 43%<sup>[31]</sup>。

这些研究都说明气候变化温度升高对植物矿质元素利用率有显著影响。

国内李裕等<sup>[24]</sup>连续 3a 模拟气候变化温度升高 1、2 和 3℃ 处理条件下,发现升温处理提高了土壤中 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Mn 的溶解性,改变了 3 种小麦籽粒对这些元素的吸收和转移能力,并且转移能力随温度升高的程度和品种差异而异。但在同样的环境条件下,马铃薯叶比块茎具有更强的金属元素聚集能力。3℃ 的升温处理导致马铃薯叶中 Cu、Zn 和 Fe 浓度分别提高了 25、27 和 24%,但使块茎中 Cd、Pb、Fe、Zn 和 Cu 分别下降了 27%、55%、41%、29% 和 23%<sup>[9]</sup>。说明气候变化对痕量元素在作物体内的分布造成了不对等的影响。

这些对于植物(作物)矿质元素利用率的研究,初步说明,气候变化温度升高,增加了土壤中矿质元素的溶解性,改变了矿质元素在植物(作物)器官的分布特征,显著地影响到作物可食部分中元素的富集水平。

### 1.2 CO<sub>2</sub> 浓度升高的影响

大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高促进了植物体内碳的再分配过程,直接影响地下根的生长、呼吸和分泌,一定程度上也会影响根对土壤矿物质的捕获,以及另外的地下生物过程,比如植物对土壤碳库的捕获过程。表 2 是文献报道中列举的几种矿质元素与植物生理过程对全球气候变化的响应。Loladze<sup>[41]</sup>综述报道植物(19 种草本植物和 11 种木本植物)叶对大量和痕量元素(如 Fe、Zn、Mn 和 Cu 等)的吸收随 CO<sub>2</sub> 浓度升高而显著下降。这些研究认为绝大多数植物主要依靠蒸腾作用获取土壤中水溶性 Ca、Mg 和 Si 营养,并受蒸腾作用驱动力随植物汁液输送到茎、秆和叶<sup>[33-34]</sup>。气候变化 CO<sub>2</sub> 浓度升高,减少了 C<sub>3</sub> 植物叶面蒸腾,显著地影响了植物对矿质元素元素捕获,并且在一年生作物和树林冠层尤为显著<sup>[33]</sup>。

在作物研究方面,Fangmeier 等<sup>[16]</sup>发现 CO<sub>2</sub> 浓度升高显著地减少了小麦对 Ca 和 Zn 的吸收。Manderscheid 等<sup>[42]</sup>利用开顶气室法(OTCs)进行的不同 CO<sub>2</sub> 浓度下两种小麦对比实验研究发现,小麦对大量和微量元素的吸收随 CO<sub>2</sub> 浓度升高而下降,且秸秆比籽粒显著。Hogy 和 Fangmeier<sup>[43]</sup>发现,小麦和水稻籽粒中大量和微量元素的平均浓度随大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高而下降了 3.7%—18.3%。正是由于

CO<sub>2</sub>浓度升高与作物矿质元素利用率之间的反馈机制,直接影响到作物蛋白质的合成,也改变了作物品质<sup>[44]</sup>。Taub 等<sup>[45]</sup>综述了 228 篇关于 CO<sub>2</sub>浓度升高(315—400ppm)对小麦、水稻等大田作物蛋白质含量影响的研究,结论是 CO<sub>2</sub>浓度升高使谷类作物籽粒中蛋白质的含量减少了 10%—15%,土豆块茎中

蛋白质减少 14%,豆类减少幅度最小,仅 1.4%。至于蛋白质等生理生化指标的变化机理并不清楚,是否与作物痕量元素利用率降低有关?因为一些离子如 Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>直接或间接地参与植物酶促反应和生理功能。

表 2 气候变化对植物矿质元素利用率的影响

Table 2 Some potential interactions of global change variables with mineral stress

| 过程<br>Processes | 气候变化<br>Climate changes     | 与矿质元素的相互作用<br>Interactions with mineral elements | 参考<br>References |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|------------------|
| 作物汁液流动驱动力       | CO <sub>2</sub> , 降雨, 光, 温度 | Ca, Mg 和 Si                                      | [31-32, 34]      |
| 根生长与构建          | CO <sub>2</sub> , 降雨和土壤温度   | P, Zn 和 N                                        | [35-37]          |
| 生物固氮            | CO <sub>2</sub>             | N                                                | [38]             |
| 光合作用            | 光, UV, 温度和降雨                | Zn, Cu, Fe, Al 和 Mn 毒性                           | [39-40]          |

由此看来,CO<sub>2</sub>浓度升高模拟试验的结果同样说明,气候变化 CO<sub>2</sub>浓度升高也显著地影响了植物(作物)对矿质元素的利用率,对于作物来讲,多数情况下以负反馈影响为主。

### 1.3 气候变化对土壤有机质的影响

土壤有机质(SOM)通过对土壤理化性质,比如阳离子交换量(CEC)、pH、氧化还原电位,以及土壤湿度和结构影响,在矿质元素的土壤—植物转移的过程中扮演着多种功能,是矿质胁迫问题中备受关注的重要问题。Stevenson<sup>[46]</sup>报道土壤有机质对 CEC 的贡献在 25 到 90%, Haynes 和 Naidu<sup>[47]</sup>估计在 40%—50%,而 Loveland 和 Webb<sup>[48]</sup>估测为 30%—60%。同时,土壤有机质也是控制土壤 pH、氧化还原电位和土壤缓冲能力主要参数。

一般情况下, SOM 包括溶解有机物(DOM, <0.45 mm), 颗粒有机物(POM>53 mm), 腐殖质和木炭等惰性有机物(IOM)<sup>[49]</sup>。正常情况下轻质的有机质和 POM 在土壤中的转化需要几年的时间,而 IOM 可以在土壤中保持几十年而不转化<sup>[50]</sup>。气候变化温度或 CO<sub>2</sub>浓度升高将改变现在土壤中有有机质组成,从而改变其对土壤结构、阳离子代换量、营养组分和金属离子的吸附作用<sup>[51]</sup>。Peterjohn 等<sup>[52]</sup>, Neff 和 Hooper<sup>[53]</sup>, Katterer 等<sup>[54]</sup>已经证实温度升高导致土壤有机质含量下降,而降雨增加情况下,土壤湿度提高和地温的降低使土壤有机质含量提高<sup>[55]</sup>。同时,降水减少和地温升高的情况下农业土壤中的泥炭体积损失达到 40%<sup>[56]</sup>。不仅如此,大量研究显

示,气候变化温度升高影响了地温、微生物活性、土壤湿度,加快了土壤有机质转换速率<sup>[57-59]</sup>。在这些研究结论的基础上,结合图 1 分析,认为气候变化对土壤有机质含量的影响,将从根本上改变土壤理化性质和矿质元素形态,对植物矿质元素利用率构成直接的、重要的影响。

## 2 问题分析

首先,从研究进展看,单因素试验研究,模拟气候变化 CO<sub>2</sub>浓度升高试验条件下,植物(包括一些作物如小麦和水稻籽粒中)对大量和痕量元素(如 Fe, Zn, Mn 和 Cu 等)的吸收一般随 CO<sub>2</sub>浓度升高而下降<sup>[43]</sup>。但模拟气候变化温度升高的试验结果却与 CO<sub>2</sub>浓度升高的不同<sup>[9, 68]</sup>,比如 3℃ 的升温处理使马铃薯叶 Zn 浓度提高了 27%,但块茎中 Zn 浓度反而下降了 29%<sup>[9]</sup>。问题是 CO<sub>2</sub>浓度和温度同时升高的情况下,作物对痕量元素利用率将如何变化?

其次,文献报道中对于作物痕量元素利用率的品种差异性,缺乏明确解释。

第三,在全球变化温度和 CO<sub>2</sub>浓度升高的情况下,植物对痕量元素的亲和性、选择性,以及耐受性如何变化?目前很少有人回答这个科学问题。

第四,从机理上看,植物对 Cd、Zn 等痕量元素的吸收、分布、储存和解毒,完全依靠几大家族的组蛋白转运能力最终实现金属元素在各器官内的动态平衡。这些转运蛋白最主要有运送组蛋白如 NRAMP、ZIP 和 YSL、排泄组蛋白如 P1BATPases, CDF、CAX

和 ABC<sup>[60]</sup>。一般情况下,ZIP 家族是调节阳离子摄取,特别是  $\text{Zn}^{2+}$  和铁离子吸收的最重要的蛋白组之一<sup>[60-61]</sup>。例如,在水稻中的 17 种 ZIP 组蛋白,其中 OsZIP1、OsZIP3 和 OsZIP4 已经确认和 Zn 的运输有关<sup>[62-63]</sup>。经酵母菌表达试验和水稻定位试验发现,OsZIP3 对锌离子有很强的亲和性,动力学测试也发现 cDNAsOsZIP1 和 OsZIP3 对  $\text{Zn}^{2+}$  吸收的酶促反应速率( $V_{\max}$ )是 OsZIP1 的两倍。不过  $\text{Cd}^{2+}$  会通过 OsZIP1 的竞争而降低 ZIP 组蛋白对  $\text{Zn}^{2+}$  的亲合性<sup>[64]</sup>。Moreau<sup>[65]</sup>等在大豆 ZIP 蛋白质转运金属离子的研究中也发现 GmZIP1 以  $13.8\mu\text{mol/L}$  的  $K_m$  值显示对锌离子具有的高度选择性,而镉离子则是唯一能抑制 Zn 摄取的金属。这些研究在分子水平上很好地解释了植物对一些痕量元素的利用的机理,只是缺乏对气候变化响应的研究。

### 3 结语

国内外关于全球气候变化对作物生长发育影响的研究取得了一定进展,但是有关未来全球气候变化对农业生态系统影响的许多内容尚不清楚,还有许多重大的科学问题急需研究和解决。矿质胁迫问题在大尺度上影响全球生态系统结构和生态平衡,在小尺度上影响农业种植结构、作物营养、农业投入,直接影响粮食安全和食品安全。就目前的研究现状,还不能回答将来气候变化对作物营养和毒性元素吸收、富集,以及由此引起的粮食和食品安全问题。为此,建议今后的研究中加强以下几个方面的重点与难点问题的研究。

(1) 全球气候变化温度和  $\text{CO}_2$  浓度升高,可能引起植物光合作用速率,蛋白质生产等植物生理和生化方面的多种效应,从而影响到植物对包括痕量元素在内的营养和非营养元素的吸收,可能直接影响粮食生产、作物品质和食品安全。建议重点从未来农业营养元素投入、非营养毒性元素的食品安全角度出发考虑解决问题,为应对气候变化提供科学依据。

(2) 很少见将  $\text{CO}_2$  浓度升高、温度升高、降雨量变化等气候因子组合,开展多因子试验,研究气候变化对矿质胁迫影响的文献报道。多因子水平组合,能够体现全球气候变化的渐变过程,若能够创造条件开展多因子水平组合模拟试验,将可能全面揭示

气候变化对矿质元素利用率影响机理。

(3) 目前全球气候变化对农作物生理生态影响的研究,多采用 OTC 开顶式气室或人工气候室法,是在人为控制条件下进行的研究。而在适应外界多因素渐变条件的 FACE 开放式生态环境或田间条件下研究较少,也有不同的争论。为了提高预测全球气候变化对作物痕量元素利用率影响的准确性,就要不断改进和完善试验方法,并加强多学科或交叉学科的研究以及技术集成研究,这将是当前和未来研究的难点之一。

(4) 加快量化研究气候变化与土壤养分变化的关系问题研究。这必将对预测未来农业生产投资成本提供较为准确的科学依据。但是,在气候变化的时空尺度上、气候和土壤质地具有较大的差异性。因此,如何创新实验方法和手段,量化研究土壤养分变化是一个具有挑战性的课题。

(5) 我国黄土高原为中心的半干旱地区约占国土面积的  $1/8$ ,耕地 0.2 亿多  $\text{hm}^2$ 。由于地貌类型复杂,气候条件多样,形成了种类繁多的抗逆性生物资源,有利于开展作物痕量元素利用率的对比研究。并且,前人利用半干旱地区遗传资源优势,已经取得的关于作物对寒、旱、盐和碱适应的细胞内平衡调节理论,对揭示作物对痕量元素利用率机理有一定科学启发。

### References:

- [1] Qin D H, Chen Z L, Luo Y, Ding Y H, Dai X S, Ren J W, Zhai P M, Zhang X Y, Zhao Z C, Zhang D E, Gao X J, Shen Y P. Updated Understanding of Climate Change Sciences. *Adv. Clim. Change Res.*, 2007, 3 (2): 63-73.
- [2] Liu Y S, Liu Y, Guo L Y. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 905-910.
- [3] Xiao G J, Zhang Q, Yao Y B, Yang S M, Wang R Y, Xiong Y C, Sun Z J. Effects of elevated  $\text{CO}_2$  concentration, supplemental irrigation and nitrogenous fertilizer application on rain-fed spring wheat yield. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1408-1535.
- [4] Zhang Qi, Deng Z Y, Zhao Y D. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [5] Lynch J P, St. Clair S B. Mineral stress: the missing link in understanding how global climate change will affect plants in real world soils. *Field Crops Research*, 2004, 90: 101-115.
- [6] Lynch J. The role of nutrient efficient crops in modern agriculture. *J. Crop Prod.*, 1998, 1: 241-264.
- [7] Bank W. *World Development Indicators*. New York: The World

- Bank, 2002.
- [ 8 ] Li Y, Zhang Q, Wang R Y, Xiao G J, Wang S. The carcinogenic potential and bioavailability of cadmium (Cd) from food. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2010, 22(2):179-180.
- [ 9 ] Li Y, Zhang Q, Wang R Y, Gou X, Wang H L, Wang S. Temperature changes the dynamics of trace element accumulation in *Solanum tuberosum* L. Climatic Change, 2012, 112 ( 3 ) : 655-672.
- [ 10 ] Auld D S. Zinc coordination sphere in biochemical zinc sites. Biometals, 2001, 14:271-313.
- [ 11 ] Frederickson C J, Koh J Y, Bush A I. The neurobiology of zinc in health and disease. Nat. Rev. Neurosci, 2005, 6:449-462.
- [ 12 ] Kawachi M, Kobae Y, Mori H, Tomioka R, Lee Y, Maeshima M. A mutant strain *Arabidopsis thaliana* that lacks vacuolar membrane zinc transporter MTP1 revealed the latent tolerance to excessive zinc. Plant Cell Physiol, 2009, 50: 1156-1170.
- [ 13 ] Graham R D, Welch R M, Saunders S A, Saunders D A, Ortiz-Monasterio I, Bouis H E, Bonierbale M, Haan S, Burgos G, Thiele G, Liria R, Meisner C A, Beebe S E, Potts M J, Kadian M, Hobbs P R, Gupta R K, Twomlow S J. Nutritious subsistence food systems. Adv Agron, 2007, 92:1-74.
- [ 14 ] Maret W, Sandstead H H. Zinc requirements and the risks and benefits of zinc supplementation. J Trace Elem Med Biol, 2006, 20:3-18.
- [ 15 ] Wakimoto P, Block G. Dietary intake, dietary patterns, and changes with age: an epidemiological perspective. J Gerontol A Biol Sci Med Sci, 2001, 56:65-80.
- [ 16 ] Fangmeier A, Gruters U, Hög P, Vermehren B, Jäger H J. Effects of elevated CO<sub>2</sub> nitrogen supply and tropospheric ozone on spring wheat. 2. Nutrients (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn). Environ. Pollut, 1997, 96(1):43-59.
- [ 17 ] Chen H M, Zheng C R, Tu C, Zhu Y G. Heavy metal pollution in soils in China: status and countermeasures. Ambio. 1999, 28: 130-134.
- [ 18 ] Nan Z R, Zhao C Y, Li J J, Chen F H, Sun W. Relations Between Soil Properties and Selected Heavy Metal Concentrations in Spring Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Grown in Contaminated Soil. Water, Air, and Soil Pollution, 2000, 13:205-213.
- [ 19 ] Coughtrey P J, Thorne M C. Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems, a Critical Review of Data. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, vols. 2 and 3, 1983.
- [ 20 ] Ehlken S, Kirchner G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. Journal of Environmental Radioactivity, 2002, 58:97-112.
- [ 21 ] Armstrong A C, Mathews A M, Portwood A M. Modelling the effects of climate change on the hydrology and water quality of structured soils, NATO ASI Series 23//Rounsevell M D A, Loveland P J, eds. Soil Responses to Climate Change. Germany: Springer-Verlag, 1994: 113-136.
- [ 22 ] Flurry M, Leuenberger M, Studer B. Pesticide Transport through Unsaturated Field Soils: Preferential Flow. CIBA Ltd., Basel, Switzerland, 1994: 293.
- [ 23 ] Rounsevell M D A, Evans S P, Bullock P. Climate change and agricultural soils: impacts and adaptation. Climatic Change, 1999, 43: 683-709.
- [ 24 ] Li Y, Zhang Q, Wang R Y, Liu N, Wang H L, Xiao G J, Ma Z Y. Influence of climatic warming on accumulation of trace elements in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 ( 12 ) : 96-104.
- [ 25 ] Li Y, Zhang Q, Gou X, Wang R Y, Xiao G J. Heavy metal contamination and its sources in rainfed agricultural and irrigated agricultural soils from central Gansu province. J Lanzhou University (Natural Sciences), 2011, 47(6):56-61.
- [ 26 ] Lynch D V, Steponkus P L. Plasma membrane lipid alterations associated with cold acclimation of winter rye seedlings. Plant Physiol, 1987, 83:761-767.
- [ 27 ] Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants. London: Academic Press Limited, 1995.
- [ 28 ] Baghour M, Moreno D A, Hernández J. Influence of root temperature on phytoaccumulation of As, Ag, Cr and Sb in potato plants (*Solanum tuberosum* L. var. *spunta*). Journal of Environmental Science and Health. Part A. Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2001, 36 ( 7 ) : 1389-1401.
- [ 29 ] Albrecht A, Schultze U, Liedgens M, Flühler H, Frossard E. Incorporating soil structure and root distribution into plant uptake models for radionuclides: toward a more physically based transfer model. Journal of Environmental Radioactivity, 2002, 59 ( 3 ) : 329-350.
- [ 30 ] Ekvall L, Greger M. Effects of environmental biomass-producing factors on Cd uptake in two Swedish ecotypes of *Pinus sylvestris*. Environmental Pollution, 2003, 121(3):401-411.
- [ 31 ] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Warming and drought change trace element bioaccumulation patterns in a Mediterranean shrubland. Chemosphere, 2008, 70(5):874-885.
- [ 32 ] Barber S A. Soil Nutrient Bioavailability: a Mechanistic Approach (2nd). New York USA: John Wiley & Sons Inc, 1995.
- [ 33 ] Elizabeth A A, Phillip A D, Carl J B, Orla C D Emily A H, David J M Patrick B M, Shawna L N, Hyung-shim Y R, Xin G Z, Peter S C, Stephen P L. A metaanalysis of elevated CO<sub>2</sub> effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield. Global Change Biol, 2002, 8: 695-709.
- [ 34 ] Wullschlegel S, Gunderson C, Hanson P J, Wilson K, Norby R. Sensitivity of stomatal and canopy conductance to elevated CO<sub>2</sub> concentration—interacting variables and perspectives of scale. New Phytol, 2002, 153: 485-496.
- [ 35 ] Gorissen A. Elevated CO<sub>2</sub> evokes quantitative and qualitative changes in carbon dynamics in a plant-soil system: mechanisms and implications. Plant Soil, 1996, 187: 289-298.
- [ 36 ] Gregory P J, Palta J A, Batts G R. Root systems and root:mass ratio-carbon allocation under current and projected atmospheric conditions in arable crops. Plant Soil, 1996, 187: 221-228.
- [ 37 ] Rogers H H, Prior S A, Runion G B. Root to shoot ratio of crops as influenced by CO<sub>2</sub>. Plant Soil, 1996, 187: 229-248.
- [ 38 ] Hartwig U A, Lüscher A, Nosberger J, Van Kessel C. Nitrogen-15 budget in model ecosystems of white clover and perennial ryegrass exposed for four years at elevated atmospheric pCO<sub>2</sub>.

- Global Change Biol, 2002, 8: 194-202.
- [39] Krupa Z, Baszynski T. Some aspects of heavy metals toxicity towards photosynthetic apparatus-direct and indirect effects on light and dark reactions. *Acta Physiol Plant*, 1995, 17: 177-190.
- [40] Clijsters H, Cuypers A, Vangronsveld J. Physiological responses to heavy metals in higher plants; defence against oxidative stress. *Z. Naturforsch. C: Biosci*, 1999, 54: 730-734.
- [41] Loladze I. Rising atmospheric CO<sub>2</sub> and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry?. *Trends Ecol. Evol*, 2002, 17: 457-461.
- [42] Manderscheid R, Bender J, Jager H J, Weigel H J. Effects of season long CO<sub>2</sub> enrichment on cereals. II. Nutrient concentrations and grain quality *Agriculture, ecosystems & environment*, 1995, 54: 175-185.
- [43] Högy P, Fangmeier A. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on grain quality of wheat. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48: 580-591.
- [44] Högy P, Wieser H, Köhler P, Schwadorf K, Breuer J, Erbs M, Weber S, Fangmeier A. Does elevated atmospheric CO<sub>2</sub> allow for sufficient wheat grain quality in the future?. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2009, 82: 114-121.
- [45] Taub D, Miller B, Allen H. Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Glob. Change Biol*, 2008, 14: 565-575.
- [46] Stevenson F J. *Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions*. New York: Wiley and Sons, 1994: 512.
- [47] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51: 123-137.
- [48] Loveland P, Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research*, 2003, 70: 1-18.
- [49] Skjemstad J O, Janik L J, Taylor J A. Non-living soil organic matter: what do we know about it?. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1998, 38: 667-680.
- [50] Krull E S, Baldock J A B, Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover. *Functional Plant Biology*, 2003, 30: 207-222.
- [51] Sholkovitz E R, Copeland D. The coagulation, solubility and adsorption properties of Fe, Mn, Cu, Ni, Cd, Co and humic acid in river water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 181-189.
- [52] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, Newkirk K M, Bowles F P, Aber J D. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures. *Ecological Applications*, 1994, 4: 617-625.
- [53] Neff J C, Hooper D U. Vegetation and climate controls on potential CO<sub>2</sub>, DOC and DON production in Northern latitude soils. *Global Change Biology*, 2002, 8: 872-884.
- [54] Katterer T, Reichstein M, Andren O. Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27: 258-262.
- [55] Robinson C H, Wookey P A, Parsons A N, Welker J M, Callaghan T V, Press M C, Lee J A. Responses of plant litter decomposition and nitrogen mineralization to simulated climate change in a high arctic polar semidesert and a subarctic dwarf shrub heath. *Oikos*, 1995, 74: 503-512.
- [56] Kuntze H. Bogs as sinks and sources of C and N. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 1993, 69: 277-280.
- [57] Knorr W, Prentice I C, House J I, Holland E A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, 433: 298-301.
- [58] Fang C M, Smith P, John B M, Smith J U. Similar responses of labile and resistant soil organic matter to changes in temperature. *Nature*, 2005, 433: 57-59.
- [59] Reichstein M, Katterer T, Andren O. Temperature sensitivity of decomposition in relation to soil organic matter pools: critique and outlook. *Biogeosciences*, 2005, 2: 317-321.
- [60] Hall J L, Williams L E. Transition metal transporters in plants. *J. Experim. Bot*, 2003, 54: 2601-2613.
- [61] Colangelo EP, Gueriot M L. Put the metal to the petal, metal uptake and transport throughout plants. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2006, 9: 322-330.
- [62] Chen W R, Feng Y, Chao Y E. Genomic analysis and expression pattern of OsZIP1, OsZIP3, and OsZIP4 in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different zinc efficiency. *Russ. J. Plant Physiol*, 2008, 55: 400-409.
- [63] Ramesh S A, Shin R, Eide D J. Differential metal selectivity and gene expression of two zinc transporters from rice. *Plant Physiol*, 2003, 133: 126-134.
- [64] Roosens N, Verbruggen N, Meerts P. Natural variation in cadmium tolerance and its relationship to metal hyperaccumulation for seven populations of *Thlaspi caerulescens* from Western Europe. *Plant Cell Environment*, 2003, 26: 1657-1672.
- [65] Moreau S, Thomson R M, Kaiser B N. GmZIP1 encodes a symbiosis-specific zinc transporter in soybean. *J Biol Chem*, 2002, 277: 4738-4746.

#### 参考文献:

- [1] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 丁一汇, 戴晓苏, 任贾文, 翟盘茂, 张小曳, 赵宗慈, 张德二, 高学杰, 沈永平. 气候变化科学的最新认知. *气候变化研究进展*, 2007, 3(2): 63-73.
- [2] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 905-910.
- [4] 张强, 邓振镛, 赵映东. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [8] 李裕, 张强, 王润元, 肖国举, 王胜. 镉的致癌性与食品中镉的生物有效性. *生命科学*, 2010, 22(2): 179-180.
- [24] 李裕, 张强, 王润元, 刘宁, 王鹤龄, 肖国举, 勾昕, 马志英. 气候变暖对春小麦籽粒痕量元素利用率的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 96-104.
- [25] 李裕, 张强, 勾昕, 王润元, 肖国举. 灌溉与雨养农业土壤中的重金属污染源. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(6): 56-61.
- [66] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述. *地球科学进展*. 2005, 20(9): 990-998.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.5 Mar., 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Advance in the study on drought index ..... LI Bozhen, ZHOU Guangsheng (1043)
- State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops .....  
..... LI Longqing, WU Zhengyun, ZHANG Qiang, et al (1053)
- Mechanism, hypothesis and evidence of herbivorous insect-host interactions in forest ecosystem .....  
..... ZENG Fanyong, SUN Zhiqiang (1061)
- Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web .....  
..... CHEN Yunfeng, HAN Xuemei, LI Yufei, et al (1072)
- A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China .....  
..... ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng (1085)
- Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China; a case study in Xining .....  
..... GAO Yun, XIE Miaomiao, FU Meichen, et al (1094)
- Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon; a case study in the  
hilly and gully area of Northern Shaanxi Province ..... ZHAO Mingyue, ZHAO Wenwu, ZHONG Lina (1105)
- Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill  
sludge ..... CHEN Xufei, ZHANG Chi, DAI Jun, et al (1114)

### Autecology & Fundamentals

- Regulation of potassium supply and signal inhibitors on acetate effluxes by ectomycorrhizal fungi .....  
..... YANG Hongjun, LI Yong, YUAN Ling, et al (1126)
- Arsenic induces guard cell death in leaf epidermis of *Vicia faba* ..... XUE Meizhao, YI Huilan (1134)
- Identification and characteristics of phenol degrading bacteria ad049 screened from oil contaminated soil .....  
..... HU Ting, GU Jie, ZHEN Lisha, YANG Jiu, et al (1140)
- Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy .....  
..... FU Chuan, YU Shunhui, HUANG Yimin, et al (1149)
- Effects of sowing date on 2-acetyl-1-pyrroline content and yield of late season aromatic rice .....  
..... YANG Xiaojuan, TANG Xiangru, WEN Xiangcheng, et al (1156)
- Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress .....  
..... WANG Qiaoling, ZOU Jinhua, LIU Donghua, et al (1165)
- The study of *Vitex negundo* shrubs canopy biomass inversion in Beijing Jundu mountainous area based on vegetation indices .....  
..... GAO Mingliang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1178)
- Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses ..... LI Xi, WANG Lihua, LIU Wei, et al (1189)
- Geostatistical analysis on spatial dynamics of the apterous *Myzus persicae* in flue-cured tobacco fields of Enshi tobacco area, China ...  
..... XIA Pengliang, WANG Rui, WANG Changjun, et al (1198)
- Patterns of seed predation and removal of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) by rodents .....  
..... ZHANG Jinghong, LIU Bingwan (1205)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant  
plants and soil in alpine meadow ..... LI Qianqian, ZHAO Xu, GUO Zhenggang (1212)

- Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses ..... XIE Xiaoling, ZHOU Rong, DENG Zifa (1224)

### Population, Community and Ecosystem

- The main nest predators of birds breeding in artificial nest-boxes and its influencing factors ..... ZHANG Lei, LI Donglai, MA Ruiqiang, et al (1235)
- Temporal and spatial variation of macrobenthic communities in the intertidal zone of Xunpu, Quanzhou Bay ..... ZHUO Yi, CAI Lizhe, GUO Tao, et al (1244)
- The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin ..... ZHANG Haiping, WU Dayong, WANG Zhaoming, et al (1253)
- Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland ..... LU Xinxin, LIU Yan, FAN Yawen (1264)
- Habitat assessment of sika deer (*Cervus nippon*) in the Taohongling National Nature Reserve, Jiangxi Province, China ..... LI Jia, LI Yankuo, MIAO Lujun, et al (1274)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation ..... GUO Ziliang, CUI Guofa (1284)
- Response of vegetation coverage to climate change in Mongolian Plateau during recent 10 years ..... MIAO Lijuan, JIANG Chong, HE Bin, et al (1295)
- Impact analysis of human activities and climate change on Honghu lake's spring drought ..... LIU Kequn, LIANG Yitong, ZHOU Jinlian, et al (1302)
- Lakes evolution of central Wuhan during 2000 to 2010 ..... DAN Yongli, WANG Hongzhi, ZHANG Huan, et al (1311)

### Resource and Industrial Ecology

- The spatial distribution of *Ophiocordyceps sinensis* suitability in Sanjiangyuan Region ... LI Fen, WU Zhifeng, XU Cui, et al (1318)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 象伟宁

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 5 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 5 (March, 2014)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel: (010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 王如松                                                                                                                | Editor-in-chief | WANG Rusong                                                                                                                                                                       |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                      |
| 主 办           | 中国生态学学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                  |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                 |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                          |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail: journal@ cspg. net                       | Distributed by  | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel: (010)64034563<br>E-mail: journal@ cspg. net                                             |
| 订 购           | 全国各地邮局                                                                                                             | Domestic        | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                   |
| 国外发行          | 中国国际图书贸易总公司<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China                                                                                         |
| 广告经营<br>许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号                                                                                                     |                 |                                                                                                                                                                                   |



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元