

大气 CO₂ 浓度升高和施氮对麦季土壤有效态微量元素含量的影响

王小治^{1,2}, 孙伟², 封克², 任思荣¹, 谢祖彬¹, 朱建国¹

(1.土壤与农业可持续发展国家重点实验室,中国科学院南京土壤研究所,江苏南京 210008;2.扬州大学环境科学和工程学院,江苏扬州 225009)

摘要: 利用中国的稻/麦轮作 FACE(Free Air Carbon-dioxide Enrichment)平台技术,研究大气 CO₂ 浓度升高(比周围大气高 200 μmol·mol⁻¹)和不同施 N 水平(常氮, 250 kg N·hm⁻²;低氮, 150 kg N·hm⁻²)对麦田土壤微量元素有效性的影响。结果表明,CO₂ 浓度升高在一定程度上增加了土壤有效态微量元素含量,其中对 DTPA-Cu 和 Zn 的增加趋势尤为明显;常规施氮水平下土壤有效态微量元素含量高于低氮水平。对 CO₂ 浓度升高增加了土壤微量元素有效性的原因做了初步分析,并指出大气 CO₂ 浓度增加可能会影响到农业生态系统中土壤微量元素的地球化学循环。

关键词: CO₂ 浓度升高;麦季;N;微量元素

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)02-0530-05

Effect of CO₂ Enrichment and N Supply on Concentrations of DTPA-extractable Microelements of Soils in Wheat Season

WANG Xiao-zhi^{1,2}, SUN Wei², FENG Ke², REN Si-rong¹, XIE Zu-bin¹, ZHU Jian-guo¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. College of Environment Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: FACE (free-air carbon dioxide enrichment) in China was used to study the effects of elevated CO₂ and N supply on the availability of microelements in soils during the wheat growing season. The results showed that elevated CO₂ increased, to some extent, the concentrations of soil DTPA-extractable microelements at different stages of wheat growth, especially the concentrations of DTPA-extractable Cu and Zn. The concentrations of DTPA-extractable microelements in soils in the normal N treatment (NN, 250 kg N·hm⁻²) were higher than those in the low N treatment (LN, 150 kg N·hm⁻²) under both FACE and ambient conditions. The reason of the increase in the soil DTPA-extractable microelement concentrations by elevated CO₂ was discussed in this paper. The geochemistry cycle of the microelements in soils of the agricultural ecosystem could be influenced by elevated CO₂ in the atmosphere.

Keywords: elevated CO₂; wheat season; nitrogen; microelement

据报道,因森林砍伐、化石燃料的燃烧等人为活动导致大量碳素进入大气,促使大气中 CO₂ 浓度升高,这种趋势使它由工业革命前(大约 1750 年)的(280±10)μmol·mol⁻¹增长到目前(2001 年)的大约 370μmol·mol⁻¹[1],并继续以每年 1.8 μmol·mol⁻¹的速度递增[2],到 21 世纪末可能达到 700 μmol·mol⁻¹[3]。研

究表明,高 CO₂ 浓度促进植物光合作用,使植物生长加快[4]。当今世界,微量元素在农业生产中的作用已引起广泛关注,微量元素常常成为农作物产量的限制因子[5]。同时土壤微量元素供应状况还会对作物及农产品的品质产生重要影响[6]。因此研究高 CO₂ 下土壤中微量元素的有效性就非常重要。我国尚缺乏这方面的研究。

目前国内关于冬小麦对 CO₂ 浓度升高响应的研究不多[7],主要研究集中在 CO₂ 浓度升高对 N、P、K 的吸收方面,很少涉及冬小麦整个生长期土壤中微量元素变化情况。本文利用我国惟一的开放式空气 CO₂ 浓度增加的 FACE 研究平台(Free-Air Carbon-Dioxide

收稿日期: 2007-04-10

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(40120140817);中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX-2-408);江苏省“青蓝工程”

作者简介: 王小治(1975—),男,江苏新沂人,博士,副教授,主要从事土壤环境化学方面的研究和教学工作。

E-mail: xzwang@yzu.edu.cn

Enrichment), 研究了 CO₂ 浓度升高和不同施氮水平对麦田土壤微量元素的影响, 并对土壤中微量元素变化的原因做了初步分析, 以期进一步认识未来气候变化下农田微量元素的地球化学行为, 为以后农业生产提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

本试验采用稻/麦轮作 FACE 研究平台技术, 该平台位于江苏省扬州市小纪镇马陵村 (32° 35' N, 119° 42' E), 自 2004 年稻季开始运行, 关于该平台系统的软件和硬件设施等, 韩勇和刘刚等^[8,9]分别对其进行了详细阐述。试验区年降雨量 900~1 000 mm, 年平均温度约 15 °C, 年均日照时间约 2 132 h, 年无霜天数大于 220 d。土壤类型为发育于下位砂浆土的水耕人为土(水稻土), 0~15 cm 层深土壤的基本性状为: pH (H₂O) 7.9, 全碳 20.0 g·kg⁻¹, 全氮 1.45 g·kg⁻¹, 全磷 0.63 g·kg⁻¹, 全钾 14.02 g·kg⁻¹, 速效磷 10.1 mg·kg⁻¹, 速效钾 70.5 mg·kg⁻¹, 容重 1.16 g·cm⁻³, 土壤质地为砂壤 (2~0.02 mm 砂粒 57.8%, 0.02~0.002 mm 粉粒 28.5%, <0.002 mm 粘粒 13.7%)。其测定按常规方法进行^[10]。FACE 平台共有 3 个高 CO₂ 浓度实验圈 (FACE 圈) 和 3 个对照圈 (Ambient 圈)。FACE 圈设计为正八角形, 直径为 12.5 m, 通过 FACE 圈周围的管道向圈中心喷射纯 CO₂ 气体, 电脑控制圈内 CO₂ 浓度, 使其全生育期平均 CO₂ 浓度保持在比正常大气 CO₂ 浓度高 200 μmol·mol⁻¹, 控制误差为 10%。对照田块没有安装 FACE 管道。除 FACE 圈 CO₂ 浓度升高外, FACE 圈和对照圈的环境条件与自然状态完全一致。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计, CO₂ 浓度为主处理, N 肥为副处理。设 2 个 CO₂ 水平, FACE 圈的 CO₂ 浓度比对照圈 (即大气中 CO₂ 浓度, 约 370 μmol·mol⁻¹) 高 200 μmol·mol⁻¹, 每个圈又设有 2 个 N 水平: 常规施氮处理 (N 250 kg·hm⁻², 以 NN 表示), 低氮处理 (N 150 kg·hm⁻², 以 LN 表示)。因此, 本试验共设 4 个处理: 正常 CO₂ 浓度下常规施氮处理、高 CO₂ 浓度下常规施氮处理、正常 CO₂ 浓度下低氮处理和高 CO₂ 浓度下低氮处理, 分别用 A-NN、F-NN、A-LN 和 F-LN 表示。

1.3 土壤的采集与分析

分别在小麦生长的分蘖期 (2006 年 3 月 12

日)、抽穗期 (2006 年 4 月 16 日)、灌浆期 (2006 年 5 月 14 日) 和成熟期 (2006 年 6 月 4 日) 采集 0~5 cm 和 5~15 cm 土壤, 放在无太阳直射的地方风干, 过 20 目尼龙筛。

土壤有效态 Fe、Mn、Cu 和 Zn 用 pH7.3 的 DTPA-CaCl₂-TEA 浸提液浸提, 用原子吸收分光光度计 (Thermo M 939QZ/989QZ) 测定^[10]。

1.4 数据处理

用 SPSS10.0 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤 DTPA-Fe 含量

CO₂ 浓度升高和氮肥施用对土壤中 DTPA-Fe 的影响见图 1。在 0~5 cm 土层 DTPA-Fe 含量随时间的推移总体上呈略微下降的趋势 (图 1a)。常氮条件下 (NN), 在灌浆期 (5 月 14 日) 和成熟期 (6 月 4 日) FACE 处理土壤 DTPA-Fe 含量为 50.4 mg·kg⁻¹ 和 42.8 mg·kg⁻¹, 分别比对照处理 (Ambient) 高 5.8% 和 10.7%; 而在 LN 水平下, 同期 FACE 处理中土壤 DTPA-Fe 含量分别比对照高 10% 和 -6.9%。在相同施 N 水平下土壤 DTPA-Fe 含量在 FACE 处理和对照处理之间均未达到统计上的显著差异 ($P=0.05$)。从图中还可看出, 不同施氮水平对土壤 DTPA-Fe 含量有较大影响。在 4 个不同采样时期, F-NN 处理土壤 DTPA-Fe 含量比 F-LN 分别高出 20.8%、2.9%、38% 和 11%, 而 A-NN 水平比 A-LN 分别高出 48.2%、8%、43.4% 和 -6.6%, 但亦均未表现出显著性差异。与 0~5 cm 土层不同的是, FACE 处理下 5~15 cm 土壤 DTPA-Fe 含量均低于对照处理 (图 1b)。其主要原因可能是大气 CO₂ 浓度增加促进植物的生长, 植物根系长度和密度明显增加^[11], 小麦根系更为发达, 对土壤中营养元素的吸收能力增强, 而距地表 5~15 cm 土层是小麦根系比较集中的区域, 因此 FACE 处理 5~15 cm 土层 DTPA-Fe 含量低于对照。

土壤 DTPA-Fe 含量在不同深度土层中有一定差异 (图 1a,b), 在对照处理中, NN 和 LN 水平下 0~5 cm 土层 DTPA-Fe 含量在 4 个时期中均有 3 次高于 5~15 cm 土层。而在 FACE 处理下, 0~5 cm 土层 DTPA-Fe 含量明显高于 5~15 cm 土层, 不同时期 NN 和 LN 水平下 0~5 cm 土层 Fe 含量比 5~15 cm 土层分别高出 49%、11%、95%、64% 和 26%、26.2%、61%、47.1%。

2.2 土壤 DTPA-Mn 含量

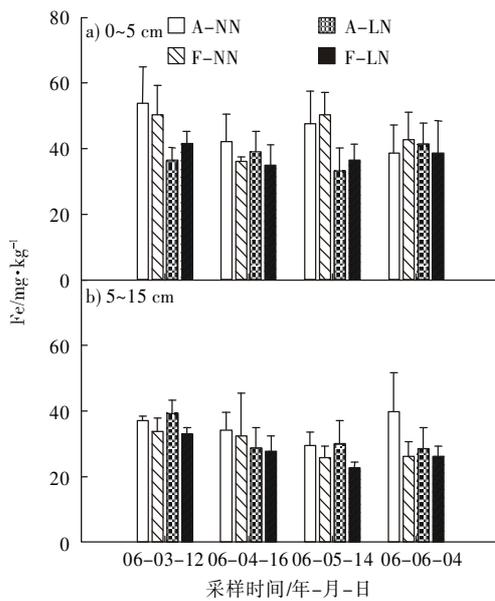


图 1 CO₂ 处理和施 N 对土壤有效态 Fe 含量的影响
Figure 1 Effect of CO₂ enrichment and N supply on the concentration of DTPA-extractable Fe in soils.

Values are shown as means \pm 1 \times SE

在 0~5 cm 土层, NN 水平下 FACE 处理土壤 DTPA-Mn 含量除在分蘖期显著低于对照处理外,其余时期均与对照很接近(图 2a)。比较不同施 N 水平下土壤 DTPA-Mn 含量,可以看出不论是 FACE 还是对照处理 NN 水平均明显高于 LN 水平。在 4 个采样时期 FACE 和对照处理 NN 水平土壤 DTPA-Mn 含量比 LN 分别高 38.7%、26.5%、55.1%、27.7% 和 67.7%、24.2%、54.4% 和 24.5%。在 5~15 cm 土层(图 2b),不同时期 NN 水平下 FACE 处理土壤 DTPA-Mn 含量均低于对照处理,分别相当于对照处理的 71.6%、71.9%、62.6% 和 37%。即随着生育期的推移,FACE 处理土壤 DTPA-Mn 含量低于对照处理的程度有变大的趋势。不论是对照还是 FACE 处理 NN 水平下土壤 DTPA-Mn 含量均大于 LN,但未表现出显著性差异。

比较不同土层 DTPA-Mn 含量(图 2a,b),可以发现 0~5 cm 土层明显高于 5~15 cm 土层,在常氮条件下尤其明显。如常氮条件下,对照处理 0~5 cm 土层 DTPA-Mn 含量比 5~15 cm 土层在不同时期分别高出 415%、58%、241% 和 25%,FACE 处理分别高出 309%、118%、447% 和 281%。除第一次外,后面 3 个时期 FACE 处理不同土层 DTPA-Mn 含量差异程度均高于对照,且随生育期的推移更为明显。

2.3 土壤 DTPA-Cu 含量

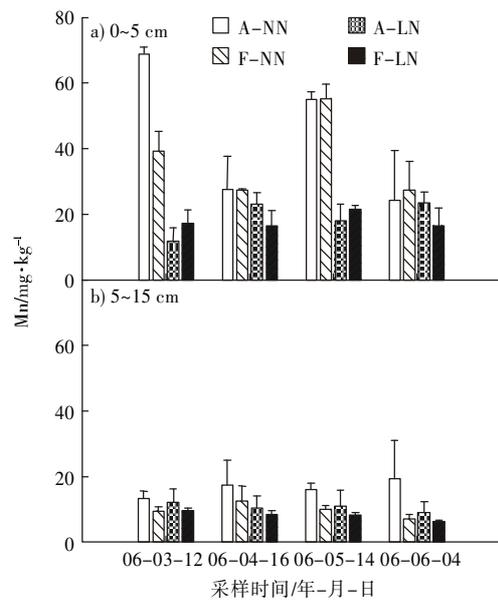


图 2 CO₂ 处理和施 N 对土壤植物有效态 Mn 含量的影响
Figure 2 Effect of CO₂ enrichment and N supply on the concentration of DTPA-extractable Mn in soils.

Values are shown as means \pm 1 \times SE

如图 3 所示,从小麦分蘖期到最后的成熟期,不同处理不同土层的土壤 DTPA-Cu 含量都呈下降趋势。在 0~5 cm 土层(图 3a),与对照相比,FACE 处理提高了土壤 DTPA-Cu 含量,NN 和 LN 水平下平均增幅分别为 26%、27%、18%、32% 和 14%、6%、25%、29%。同时可以看出,土壤 DTPA-Cu 含量受施氮水平的影响,常 N 条件下土壤 DTPA-Cu 含量高于低氮条件,但未表现出显著性差异。在 5~15 cm 土层(图 3b),FACE 处理也提高了土壤 DTPA-Cu 含量,与对照相比,NN 和 LN 水平下增幅分别为 20%、12%、31%、7% 和 25%、16%、6%、16%。但施氮水平的高低对该层土壤 DTPA-Cu 含量无明显影响。

比较不同土层土壤 DTPA-Cu 含量发现(图 3a,b),在对照处理中不同土层之间无规律性差异,而在 FACE 处理中 0~5 cm 土层土壤中 DTPA-Cu 含量明显高于 5~15 cm 土层。不同时期 F-NN 处理 0~5 cm 土壤 DTPA-Cu 含量比 5~15 cm 分别高 12%、8%、9% 和 10%。在 LN 水平上也有相同的趋势。

2.4 土壤 DTPA-Zn 含量

CO₂ 浓度升高和施 N 对不同土层 DTPA-Zn 含量的影响如图 4 所示。在小麦生长期,不同土层土壤 DTPA-Zn 含量呈先上升后下降的趋势,在抽穗期达到最大。在 0~5 cm 土层(图 4a),高 CO₂ 浓度增加了土壤 DTPA-Zn 含量,与对照处理相比,NN 和 LN 水

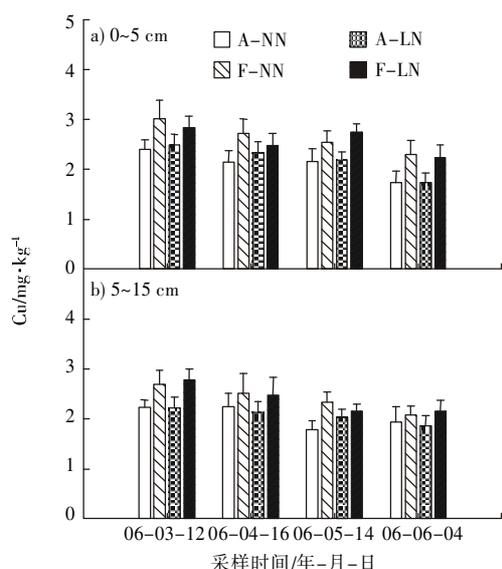


图 3 CO₂ 处理和施 N 对土壤植物有效态 Cu 含量的影响

Figure 3 Effect of CO₂ enrichment and N supply on the concentration of DTPA-extractable Cu in soils.

Values are shown as means \pm 1×SE

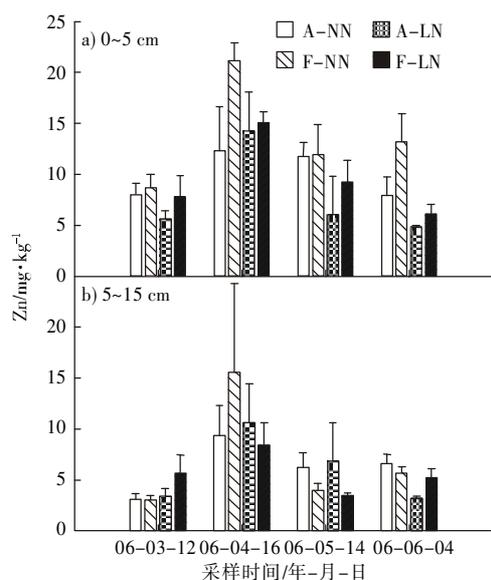


图 4 CO₂ 处理和施 N 对土壤植物有效态 Zn 含量的影响

Figure 4 Effect of CO₂ enrichment and N supply on the concentration of DTPA-extractable Zn in soil.

Values are mean \pm 1×SE

平下其增幅分别为 8%、72%、2%、66%和 38%、6%、52%、26%。同时施氮量的增加有增加土壤 DTPA-Zn 含量的趋势,FACE 和对照处理下增幅分别为 12%、41%、30%、116%和 43%、-13%、94%、64%。在 5~15 cm 土层(图 4b),高 CO₂ 浓度和施 N 对土壤 DTPA-Zn 含量影响的规律性不明显。

比较不同土层土壤 DTPA-Zn 含量,发现 0~5 cm 土壤 DTPA-Zn 含量高于 5~15 cm。F-NN 和 A-NN 处

理不同时期 0~5 cm 土层土壤 DTPA-Cu 含量比 5~15 cm 分别高 184%、36%、202%、131%和 157%、31%、89%、20%。在 LN 水平上也有相同的趋势。

3 讨论

植物生长发育所必需的微量元素,往往在土壤中含量少、有效性低,所以在缺少微量元素的土壤或对微量元素敏感的作物上施用微肥一般有很好的效果,因此土壤微量元素有效性和作物的微量元素营养引起了国内外科学工作者的重视。但目前有关大气 CO₂ 浓度升高对土壤微量元素有效性的影响鲜有报道,特别是 FACE 对稻麦轮作条件下土壤微量元素养分有效性的影响,这可能是因为土壤养分元素(除 N 素外)在全球气候变化的时间尺度下很难发生显著性的改变^[12],而 Rounsevell 提出土壤化学过程可能对全球气候变化快速相应的假设^[13]。本文对麦季土壤 DTPA 提取态 Fe、Mn、Cu 和 Zn 测定结果显示,大气 CO₂ 浓度增加明显影响土壤有效态微量元素含量。

用 DTPA 浸提剂浸提土壤中有有效态的 Fe、Mn、Cu 和 Zn 是目前的常用方法。DTPA 提取态常用来衡量土壤中对植物有效的金属元素含量^[14],并且经常用来评价土壤微量元素的生物有效性^[15,16]。本文的结果表明,尽管多数数据统计不显著,高 CO₂ 浓度在一定程度上增加了土壤中 Fe、Mn、Cu 和 Zn 的有效性,其中对 DTPA-Cu 和 Zn 的增加趋势尤为明显。同一土层中 4 种元素有效态含量和在小麦生长期间的变化规律也有所不同,受大气 CO₂ 增加和氮肥的影响有所差异。如在 0~5 cm 和 5~15 cm 土层中土壤有效态 Fe、Mn 含量较高,而土壤有效态 Cu 含量低的多;以 0~5 cm 土层为例,在常氮条件下,土壤 Fe 和 Mn 有效态含量存在先下降后上升在下降的波动规律,土壤 Zn 有效态含量呈现先升高后下降的趋势,而土壤 Cu 有效态含量变化很小,基本保持相对恒定。

微量元素的植物吸收及其在土壤中自身的化学/物理作用,使得不同微量元素有效态含量在不同土层中分布存在差异。从本文结果可以看出,土壤 Mn 有效态含量随深度变化差异比其他元素大,而有效态 Cu 含量在 0~5 cm 和 5~15 cm 土层中差异很小。

随着大气 CO₂ 浓度的增加,植物的光合作用逐渐增强,进而引起根系分泌物的增加^[17-19]。王大力等研究表明,CO₂ 浓度升高对水稻根系生长有明显的促进作用,高 CO₂ 浓度下水稻单株根系分泌物总量、甲酸、乙酸的释放量明显增加,改变了根际周围有机物的含

量^[20]。根系分泌物有助于提高根际土壤团聚体结构的稳定性,改善土壤颗粒和根表面的接触程度,保护根系生长,降低土壤 pH,促进土壤微量元素的溶解和络合,增加土壤微量元素生物有效性^[21]。Linehan 等的研究表明大麦的根分泌物使土壤中 Zn、Cu 的有效性增加了 3 倍^[22]。Mench 和 Fargues 等也报道燕麦根系分泌物可以溶解铁氧化物,从而增加 Zn、Cu 和 Ni 的植物有效性^[23]。同延安等^[24]在研究有机肥及化肥对土中微量元素的影响时发现,由于有机肥及其根茬腐解,降低了土壤 pH 值,促进土壤全 Zn、Fe、Mn 的分解与矿化,使其转化为有效成分。我们认为,大气 CO₂ 浓度的增加导致植物生物量的增加,促进根系生长,根系分泌物增加是土壤微量元素有效性增加的原因之一,同时另一个可能的原因是大气 CO₂ 浓度的增加会使土壤 CO₂ 分压相应增加,进而可能降低根际土壤 pH,从而增加土壤微量元素生物有效性。

本文的结果还表明,不同施 N 水平对土壤中微量元素的有效性影响很大。高 N 水平增加了土壤中微量元素的有效性。杨丽娟等^[25]研究表明长期施用氮肥能够提高土壤中 Fe、Mn、Cu 和 Zn 有效含量,而且随着氮肥用量的增加,土壤中微量元素有效性增强。这与我们研究的结果一致。

另外值得注意的是,与对照处理相比,大气 CO₂ 浓度升高使 5~15 cm 土壤 DTPA-Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量与 0~5 cm 的比值下降。表明大气 CO₂ 浓度升高在一定程度上增加了土壤 DTPA-Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量的同时,小麦从土壤吸收的 Fe、Mn、Cu 和 Zn 量也增加。土壤微量元素有效性的提高可能会增加土壤微量元素的径流损失,而植物从土壤中吸收微量元素的增加也会降低土壤微量元素的含量,因此,从长期来看,大气 CO₂ 浓度增加可能会影响到农业生态系统中土壤微量元素的地球化学循环,若能对相关机理,如根际土壤溶解性碳、Eh 和 pH 对大气 CO₂ 浓度升高的响应,及其与不同微量元素有效性之间的关联性机制做进一步深入的研究,将有助于明确 CO₂ 浓度升高和不同施氮水平对麦田土壤微量元素的影响机制。

参考文献:

- [1] Sage R F, Coleman J. Effects of low atmospheric CO₂ on plants: more than a thing of the past [J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(1): 18-24.
- [2] Mendelsohn R, Rosenberg N J. Framework for integrated assessments of global warming impacts [J]. *Climate Change*, 1994, 28: 15-44.
- [3] Mitchell J F B, Gregory J M. Climatic consequences of emissions and a comparison of IS92a and SA90 [M]. //Houghton J T, Callander B A, Varney S K eds. *Climate Change 1992: the Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, Cambridge, 1992. 173-175.
- [4] Rogers H H, Dahlman R C. Crop responses to CO₂ enrichment [J]. *Plant Ecology*, 1993, 104/105(1): 117-131.
- [5] 刘 铮. 中国土壤中微量元素的含量与分布特征 [C]// 胡思农. 硫镁和微量元素在作物营养平衡中的作用国际学术讨论会论文集. 成都: 成都科技大学出版社, 1993. 213-222.
- [6] 金继运, 何 萍, 涂仕华. 平衡施肥也要关注微量元素肥——我国农田土壤微量元素供应能力现状分析 [J]. *中国农资*, 2006, 3: 69-71.
- [7] 李伏生, 康绍忠. 两种氮水平下 CO₂ 浓度升高对冬小麦生长和氮磷浓度的影响 [J]. *土壤学报*, 2003, 40(4): 599-60.
- [8] 刘 钢, 韩 勇, 朱建国, 等. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统结构与控制 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1253-1258.
- [9] 韩 勇, 刘 钢, 朱建国, 等. 稻麦轮作 FACE 系统平台 II. 系统控制和数据分析软件 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1259-1263.
- [10] 鲁如坤, 等. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [11] Pritchard S G, Roger H H, Prior S A, et al. Elevated CO₂ and plant structure A review [J]. *Glob Change Biol*, 1999, 5: 807-837
- [12] Legros J-P, Loveland P J, Rounsevell M D A. Soils and climate change—where next [M]//Rounsevell, M D A, Loveland, P J, et al. *Soil Responses to Climate Change*, NATO ASI Series 23. Springer-Verlag, Heidelberg, 1994. 257-266.
- [13] Rounsevell M D A, Evans S P, Bullock P. Climate change and agricultural soils: impacts and adaptation [J]. *Climatic Change*, 1999, 43, 683-709.
- [14] Lindsay W L, Norvell W A L. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1978, 42: 421-428.
- [15] Sedberry J E, Blich Jr D P, Eun M Y. An evaluation of chemical methods for extracting copper from rice soils [J]. *Soil Sci Plant Anal*, 1988, 19: 1841-1857.
- [16] 刘 铮. 中国土壤微量元素 [M]. 江苏科学技术出版社, 1996. 1-24.
- [17] Diaz S, Grime J P, Harris J, et al. Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide [J]. *Nature*, 1993, 364: 616-617.
- [18] Ball A S, Drake B G. Stimulation of soil respiration by carbon dioxide enrichment of marsh vegetation [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30: 1203-1205.
- [19] Berntson G M, Bazzaz F A. Belowground positive and negative feedback on CO₂ growth enhancement [J]. *Plant and Soil*, 1996, 187: 119-131.
- [20] 王大力, 林伟宏. CO₂ 浓度升高对水稻根系的影响 [J]. *生态学报*, 1999, 19(4): 570-572.
- [21] 刘芷宇. 根际研究法 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1997.
- [22] Linehan D J, Sinclair A H, Mitchell M C. Seasonal changes in Cu, Mn, Zn and Co concentrations in soil in the root zone of barley (*Hordeum vulgare*) [J]. *J Soil Sci*, 1989, 40: 103-115.
- [23] Mench M J, Fargues S. Metal up take by iron efficient and inefficient oats [J]. *Plant and Soil*, 1994, 165: 227-233.
- [24] 同延安, 高 宗, 刘杏兰. 有机肥及化肥对土中微量元素平衡的影响 [J]. *土壤学报*, 1995, 32(3): 315-319.
- [25] 杨丽娟, 李天来, 付时丰, 等. 长期施肥对菜田土壤微量元素有效性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 549-553.