

吴同亮, 王玉军, 陈怀满, 等. 基于文献计量学分析 2016 年环境土壤学研究热点[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 205–215.

WU Tong-liang, WANG Yu-jun, CHEN Huai-man, et al. Research hotspots of environmental soil science in 2016 based on bibliometrics analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 205–215.

# 基于文献计量学分析 2016 年环境土壤学研究热点

吴同亮<sup>1,2</sup>, 王玉军<sup>1\*</sup>, 陈怀满<sup>1</sup>, 周东美<sup>1</sup>

(1.中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 本文基于文献计量学方法, 结合 CiteSpace 软件, 分析了 2016 年国内外土壤学及环境科学领域中与土壤有关论文的关键词, 揭示了 2016 年环境土壤学的研究热点和方向, 其结果在一定程度上也反映了农业环境科学领域关注的一些重点问题。我们以 Soil 为关键词, 在 Web of Science 上检索到环境科学和土壤科学 SCI 论文 11 747 篇。关键词的聚类结果显示 2016 年的研究热点是“重金属污染与生物累积效应”、“土壤有机污染与生物降解”、“土壤管理与元素循环”、“土壤固碳与全球气候变化”。中国、美国发文量名列前两位, 国内中国科学院和西北农林科技大学位列发文量前两位。在 CNKI 数据库中检索到 2936 篇核心期刊论文, 关键词共现图谱显示“土壤微生物与环境污染”、“土壤理化性质与水盐运移”、“土壤有机碳与环境效应”、“土壤区域环境与空间变异”为国内期刊论文的主要研究热点。

**关键词:** 土壤; 环境; 文献计量学; CiteSpace; 研究热点

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)02-0205-11 doi:10.11654/jaes.2017-0128

## Research hotspots of environmental soil science in 2016 based on bibliometrics analysis

WU Tong-liang<sup>1,2</sup>, WANG Yu-jun<sup>1\*</sup>, CHEN Huai-man<sup>1</sup>, ZHOU Dong-mei<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In the present study, the research hotspots of environmental soil science in 2016 was explored based on the bibliometrics analysis and CiteSpace software. The results also reflected the frontiers in the area of agricultural environment to a certain extent. When soil was selected as the key word, we collected 11 747 SCI papers included on “Web of Science” on soil science and environmental science in 2016. The clustering results of key words in 11 747 papers showed that the main research hotspots were “heavy metal pollution and bioaccumulation effects”, “soil organic pollution and biodegradation”, “soil management and the recycling of elements”, and “soil carbon sequestration and climate change”. China and USA were the top two countries contributing to these papers, while Chinese Academy of Sciences and Northwest Agriculture & Forestry University were the top two institutions in China. And also 2936 papers were collected when we chose soil as the key word in CNKI, the clustering data showed that the main research hotspots in CNKI were “soil microbial and environmental pollution”, “soil physicochemical properties and the movement of water and salts”, “soil organic carbon and environmental effect”, and “soil regional environment and spatial variation”.

**Keywords:** soils; environment; bibliometrics; CiteSpace; research hotspots

土壤与人类生存密切相关, 土壤在粮食安全与生产、环境保护、全球气候变化等领域发挥重要的作用。土壤学是一门历史悠久的学科, 其经历几个世纪的发

展, 理论与方法构建日渐成熟, 各分支学科不断创新演进。在宋长青等著《土壤科学三十年: 从经典到前沿》<sup>[1]</sup>中, 回顾了土壤学 4 个分支学科, 土壤地理学、土

收稿日期: 2017-01-25

作者简介: 吴同亮(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事重金属的环境土壤化学过程研究。E-mail: tlwu@issas.ac.cn

\* 通信作者: 王玉军 E-mail: yjwang@issas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41422105)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41422105)

壤物理学、土壤化学和土壤生物学,近30年的发展特征、研究方向的演进等,发现土壤学服务农业生产是永恒主题,土壤污染与修复研究成为重要方向,土壤学与全球气候变化联系更加紧密,土壤多学科、交叉学科创新不断涌现等基本发展态势;还通过定量与定性综合分析,阐明了各分支学科面临的挑战与机遇等。

随着人类社会的发展,在城市化进程推进及资源开发与利用中,土壤环境问题日渐突出,在《土壤学若干前沿领域研究进展》<sup>[2]</sup>一书中,宋长青等基于文献计量学对土壤重金属污染与修复,土壤有机污染与修复,纳米颗粒、抗生素及抗性基因等新兴污染物等环境科学领域研究进展做了相关分析,目前土壤环境问题较为严重,污染物层出不穷,科学研究手段不断更新,成果显著,学科交叉明显,推动了环境土壤学的进展。

文献计量学以文献体系和文献计量特征为研究对象,被广泛用于文献情报分析,进而评价某领域科学发展现状及水平<sup>[3]</sup>。本文利用 CiteSpace 软件,试图从文献计量学角度,分析 2016 年国际及国内土壤学及环境科学领域中与土壤有关的研究核心方向及研究热点。

## 1 材料与方法

本研究采用陈超美博士开发的 CiteSpace 软件(5.0.R2 SE 版本),是一种用于分析和可视化共引网络的 Java 应用程序<sup>[4]</sup>。主要利用关键词共现图谱、国家合作图谱等可视化分析 2016 年度以“土壤”为主题的文献报道中,属于土壤科学和环境科学两种学科类别的发展特点、研究热点、合作关系等。

关键词共现图中,每个节点表示一个关键词,节点大小表示关键词出现的频次,节点之间连线的粗细表示关键词共现强度的高低,即与两者共被引次数成比例,彼此间相邻的关键词表示他们经常出现在相同的文章中<sup>[5]</sup>。图中节点年轮的颜色和厚度,表示关键词出现的时间(本次分析仅针对 2016 年文献情况,因此只出现蓝色)和数量。年轮外紫色环越厚,表示该关键词中介中心性越高,说明该节点位于关键词网络较为中心的位置,是网络中各部分的过渡。

国家或机构合作网络中,节点代表论文所属国家或机构,节点大小表示该国或机构在该领域研究论文中出现频次高低,节点间连线粗细代表两国或机构间合作强度高低。

### 1.1 国际该领域关键词共现、国家合作分析的数据检索及软件参数设置情况

数据来源于美国科学情报所(Institute for Scientific Information, ISI)出版的 Web of Science 核心合集数据库,以“Soil”为主题词,时间范围选定 2016 年,Web of Science 类别为“Environmental sciences(环境科学)”和“Soil science(土壤科学)”,文献类别为“Article(文章)”。按照 CiteSpace 软件规定格式导出数据,并采用数据去重功能,预先对数据进行处理。

时间阈值:2016;节点类型:Keyword 或 Country;节点阈值:Top 100(关键词共现分析)、Top 50(国家合作分析);网络修剪方式选择 Pathfinder(寻径)和 Pruning sliced networks(修剪每篇网络);其余选项均为默认。

### 1.2 国际该领域 Top 期刊关键词分析数据检索及软件参数设置情况

分析数据来源于国际该领域关键词共现分析检索结果,并借助 Web of Science 中“来源出版物名称”功能,筛选检索结果中属于 JCR 期刊分区的 top 期刊文章,从发文量前 100 中挑选出 17 个 Top 期刊:Science of the Total Environment,Chemosphere,Agriculture Ecosystems Environment,Soil Biology Biochemistry,Plant and Soil,Environmental Science and Technology,Journal of Hazardous Materials,Water Resources Research,Soil Science Society of America Journal,Biology and Fertility of Soils,Remote Sensing of Environment,Global Change Biology,Journal of Geophysical Research Biogeosciences,European Journal of Soil Science,Water Research,Environmental Modelling Software,Environment International。软件参数设置中,节点类型选择 Keyword,其余设置同上。

### 1.3 国际该领域国家/地区发文数及中国机构的发文分析数据来源及软件参数设置情况

国家/地区发文数的统计数据在该领域关键词共现分析检索结果基础上,利用 Web of Science 中“国家/地区”筛选功能获得。中国机构发文分析则在上述国家/地区发文数统计结果中,选择中国,并按照 CiteSpace 软件规定格式导出数据。软件参数设置中,节点类型和阈值分别为 Institution 和 Top 50,无网络修剪,其余设置同上。

### 1.4 国内该领域关键词共现数据检索及软件参数设置情况

利用中国知网 CNKI 检索以“土壤”为主题词的

相关期刊文献,具体检索条件设置:时间范围:2016年,文献分类:环境科学和土壤学,期刊来源类别:核心期刊。按照 CiteSpace 软件规定格式导出数据,后进行数据格式转化,并采用数据去重功能,对数据进行处理。软件设置同国际该领域关键词共现分析。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 2016 年国际该领域研究方向及研究热点

按照相应软件设置,共搜索到 11747 篇 SCI 论文(截至 2017 年 1 月 9 日),节点数量 101 个,连线数量 82 条。关键词聚类形成 4 个相对独立的聚类圈(图1),其在一定程度上反映 2016 年国际上该研究的核心方向,可分为“重金属污染与生物累积效应”、“土壤有机污染与生物降解”、“土壤管理与元素循环”、“土壤固碳与全球气候变化”。以下分析已去除“Soil”、“Sample”等对本研究目的无实际意义的关键词,保证图谱中节点大小适宜、美观,直观体现 2016 年度该领域的研究热点。

#### 2.1.1 重金属污染与生物累积效应

从图 1 可看出重金属(Heavy metal)为该聚类图中关键节点。与重金属节点直接相连的一批关键词有污染(沾污)土壤(Contaminated soil)、农业土壤(Agricultural soil)、污泥(Sewage sludge)和沉积物(Sedi-

ment)。土壤重金属污染依然是大家关注的重点,Huang 等<sup>[6]</sup>从砷污染水稻土中分离培养出一种细菌,可有效介导砷的甲基化和挥发过程,对砷的生物修复有重要意义;Wang 等<sup>[7]</sup>发现污泥农用显著提高了银离子生物可利用性;Gai 等<sup>[8]</sup>研究了四种常见形态的汞在人工模拟及自然不饱和土壤中的迁移,发现 DOM 结合态的汞离子垂直迁移至地下水的力量最强。与重金属污染研究相连的关键词有生物可利用性(Bioavailability)、重金属形态(Speciation)、风险评价(Risk assessment)等。Li 等<sup>[9]</sup>利用体外生物可给性实验预测污染土壤中铅的相对生物可利用性,发现在较低铅污染浓度情况下,SBRC 法对矿区或冶炼厂地铅的相对生物可利用性的预测能力,可应用延伸至城市土壤;Janssen 等<sup>[10]</sup>研究了汞在微生物体内甲基化过程中同位素分馏情况,其结果对识别汞在自然体系中生物可利用性及水域食物网中汞的稳定同位素有重要作用;Li 等<sup>[11]</sup>利用 UBM,SBRC,IVG,PBET 等方法,评价镉的生物可及性(Bioaccessibility),并以此来预测镉在污染土壤中生物可利用性(Bioavailability)。中国(China)出现频次较高,说明对中国重金属污染的研究仍是国际研究热点。聚类图中还出现镉(Cadmium)、铅(Lead)、锌(Zinc)、铜(Copper)重金属元素,其中镉(Cadmium)是出现频次最高、中介中心性最强的

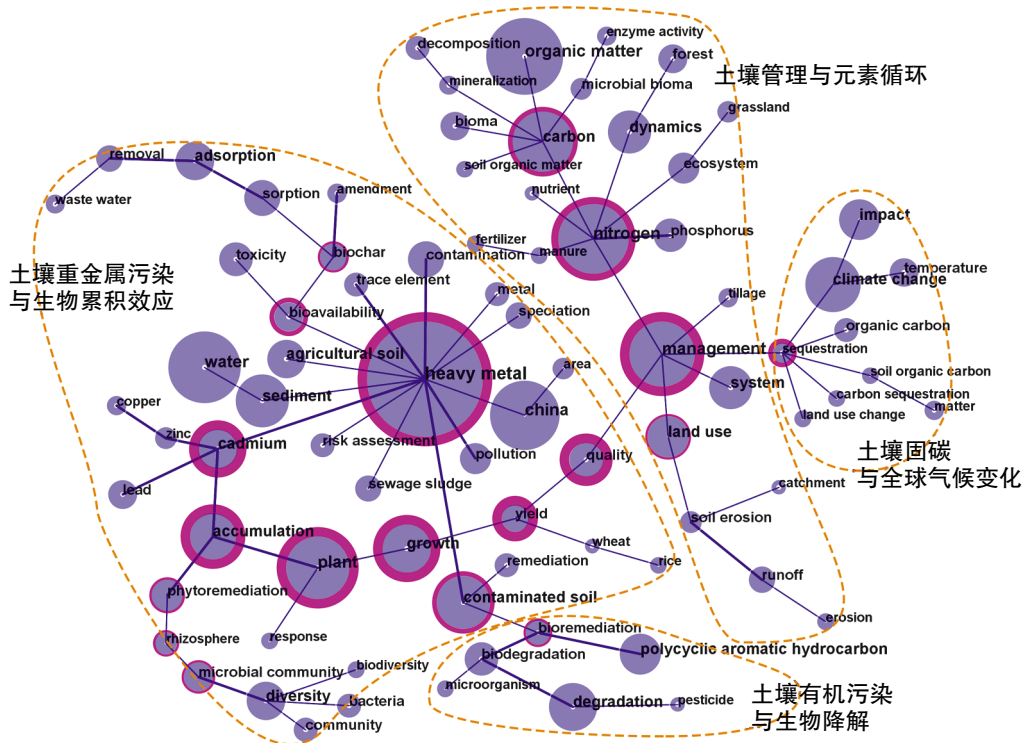


图 1 2016 年国际该领域期刊论文关键词共现关系

Figure 1 Keyword co-occurring networks of international articles in related fields in 2016

重金属元素。累积(Accumulation)、植物(Plant)、生长(Growth)、产量(Yield)、质量(Quality)、小麦(Wheat)、稻米(Rice)、植物修复(Phytoremediation)、根际(Rhizosphere)、微生物群落(Microbial community)等关键词的出现,表明植物对重金属的累积效应及修复方式受到研究人员关注。Honma 等<sup>[12]</sup>利用田间试验中不同水分管理措施,研究出在砷、镉复合污染条件下,两种污染物在水稻籽粒中累积量同时下降时的最佳土壤 Eh(-73 mV)和 pH(6.2)值。在微生物及其群落方面, Mori 等<sup>[13]</sup>利用日本北部森林土壤真菌在不同空间尺度下的多样性指标,评价自然条件下生物多样性与系统多功能性之间的关系,发现系统多功能性随当地物种丰富度提升而增加,且与真菌群落组成无关; Voort 等<sup>[14]</sup>发现土壤温度的短暂变化会造成根际微生物群落的重新分布, 及其抗病能力部分或全部丧失; Xue 等<sup>[15]</sup>利用基因芯片、高通量测序等多种宏基因组技术,对北极土壤样品分析发现,短暂升温会引起土壤微生物活动加剧,使土壤有机碳净流失,表明气候变暖会对永久冻土带脆弱的生态系统造成不利影响。此外,生物炭(Biochar)对重金属的吸附(Adsorption)、吸收(Sorption)、去除(Removal)也是关注热点之一。Zhu 等<sup>[16]</sup>使用铈掺杂生物炭吸附砷、铬等重金属,并利用 FTIR、XRD、XPS 等技术对吸附机理进行探讨,发现铈本身作为吸附位点可有效吸附重金属; Han 等<sup>[17]</sup>发现磁性生物炭中  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  上质子化的羟基位点可有效吸附去除溶液中六价铬。

### 2.1.2 土壤有机污染与生物降解

多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbon)、农药(Pesticide)为主要出现的有机污染物。生物降解(Biodegradation)、生物修复(Bioremediation)、修复(Remediation)、微生物(Microorganism)关键词的出现,表明对土壤有机污染物降解方面侧重于生物、微生物降解研究。Deary 等<sup>[18]</sup>利用动力学模型分析在铅、镉复合污染下多环芳烃生物降解情况; Kümmel 等<sup>[19]</sup>在研究中利用氢同位素分馏手段,区分苯和 2-甲基萘的好氧、厌氧生物降解途径; Adrion 等<sup>[20]</sup>筛选非离子型表面活性剂,应用于传统生物学方法修复后的多环芳烃污染土壤,可提升生物修复多环芳烃土壤的清洁水平。

### 2.1.3 土壤管理与元素循环

该聚类中出现土壤管理(Management)、耕作(Tillage)、土壤系统(System)、土地利用(Land use)、土壤侵蚀(Soil erosion)、流域(Catchment)、径流(Runoff)

等关键词,表明土壤管理中的土地耕作等使用方式仍为关注热点,对土壤侵蚀的研究主要从径流等物质迁移方式入手。如 Yue 等<sup>[21]</sup>对中国水土流失现象碳输移及  $\text{CO}_2$  汇效应进行研究,发现中国大规模水土保持实践减少土壤有机碳横向输移量,而水土流失会导致  $\text{CO}_2$  汇效应的减少。

另外,除了关注土地使用,土壤中各元素循环也是研究人员关注的重点。碳(Carbon)是较为关键的节点之一,与碳元素共现的关键词还有有机质(Organic matter)、土壤有机质(Soil organic matter)、矿化(Mineralization)、生物量(Bioma)等关键词,体现土壤中碳元素的形式、来源及转化过程。氮(Nitrogen)、磷(Phosphorus)为土壤中主要研究的营养元素,图 1 中可看出两者共现强度较高,与氮、磷两种元素相关的关键词还有营养素(Nutrient)、粪肥(Manure)、肥料(Fertilizer)以及动力学(Dynamics)、森林(Forest)、生态系统(Ecosystem)、草地(Grassland),表明研究关注氮磷元素的施用形式,以及森林、草地等生态系统中,氮磷元素的动力学变化过程等。García-Palacios 等<sup>[22]</sup>研究了生物和非生物因素对分解过程中凋落物碳、氮动力学过程的控制,发现将时间动态列入降解模型可提升其预测能力; Simkin 等<sup>[23]</sup>评估发现持续上升的氮沉降过程可能已经导致美国超过 1.5 万个地点的 24% 的植物物种的流失,而草地、灌木地、开阔林地以及酸性土壤区域极易受到氮沉降的威胁; Homyak 等<sup>[24]</sup>发现干旱会使氮在土壤中积累,而湿润季节会让一氧化氮从土壤中释放。

### 2.1.4 土壤固碳与全球气候变化

聚类图中关键词主要有气候变化(Climate change)、影响(Impact)、温度(Temperature)、碳固定(Carbon sequestration)、土壤有机碳(Soil organic carbon)、土地利用变化(Land use change)等,表明土壤固碳是减缓气候变化的主要途径,以及土地利用方式的改变对碳固定影响受到广泛关注。Smith 等<sup>[25]</sup>发现了卫星系统模型和地球系统模型对全球陆地二氧化碳施肥效应的估算产生很大差距,而产生差距的原因是地球系统模型对二氧化碳施肥效应的过度敏感,其研究结果可提升对今后碳循环及气候变化反馈的准确预测能力; Tian 等<sup>[26]</sup>发现南亚地区农业活动中甲烷及氮氧化物的减少将有助于缓解全球气候变化问题; Wolf 等<sup>[27]</sup>利用直接测量、卫星数据和数学建模结合的方式量化了早春植物活动对温室气体摄取过程,发现其在当年抵消了土壤干旱对碳储存的降低,使美国本土表现为净

碳汇;Cai 等<sup>[28]</sup>解析了湿地土壤氧化大气甲烷的机制,发现传统甲烷氧化菌,在此过程中发挥了主要作用,为全球甲烷和碳循环、气候变化的计算模拟提供了新视角。

利用 Web of Science 核心合集数据库得到的相关期刊论文的关键词共现图,反映了 2016 年度土壤科学和环境科学两种学科类别中,与土壤有关研究的核心领域。而 2016 年 TOP20 高频关键词列表更加直观反映当年研究热点,如表 1 左侧所示,前 10 位高频关键词依次为重金属(Heavy metal)、有机质(Organic matter)、水(Water)、氮(Nitrogen)、中国(China)、土壤管理(Management)、植物(Plant)、碳(Carbon)、气候变化(Climate change)、沉积物(Sediment)。表明土壤重金属污染及植物累积等问题是 2016 年研究领域中的热点议题,土壤有机质、水及碳氮元素等关键土壤组分受到广泛重视。同时,土壤管理过程中碳元素固定问题深刻影响全球气候变化过程。此外,土壤多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbon)污染仍受大家的重视。

利用 Web of Science 中“来源出版物名称”功能,

筛选检索结果中属于 JCR 期刊分区的 top 期刊文章。一共筛选得到 3225 篇文章,其 TOP20 高频关键词列于表 1 中间。同左侧相比,关键词及其排列顺序有所不同,体现 TOP 期刊发文所关注的研究热点及侧重点。有机质(Organic matter)、气候变化(Climate change)、氮(Nitrogen)、碳(Carbon)、重金属(Heavy metal)、水(Water)、土壤管理(Management)仍然出现在前 10 名高频关键词中,而对土壤中重金属的关注度有所下降,土壤与全球气候变化的关系得到 TOP 期刊作者广泛研究;降解、动力学、模型三个关键词进入前 10 高频关键词,表明更加注重土壤中物质的动态过程研究。

## 2.2 2016 年国际该领域国家/地区发文数、合作情况及中国机构的发文分析

利用 Web of Science 自带分析检索功能,对 11 747 条检索结果进行国家/地区发文数量分析。如图 2 所示,发文数前 10 的国家/地区依次为中国、美国、德国、澳大利亚、西班牙、法国、加拿大、印度、意大利、英格兰。其中,中国是该研究领域发文数量最多的国家,共发表 3269 篇文章,占有检索结果 27.83%;美

表 1 2016 年该领域 TOP20 高频关键词

Table 1 TOP20 high-frequency keywords in related fields in 2016

| 序号<br>Number | SCI 论文<br>SCI articles          |                 | TOP 期刊论文<br>SCI articles of TOP journal |                 | 中国学者发表的 SCI 论文<br>SCI articles published by Chinese scholars |                 |
|--------------|---------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|-----------------|
|              | 关键词<br>Keywords                 | 频次<br>Frequency | 关键词<br>Keywords                         | 频次<br>Frequency | 关键词<br>Keywords                                              | 频次<br>Frequency |
| 1            | Heavy metal                     | 1214            | Organic matter                          | 282             | China                                                        | 482             |
| 2            | Organic matter                  | 824             | Climate change                          | 223             | Heavy metal                                                  | 419             |
| 3            | Water                           | 766             | Nitrogen                                | 218             | Water                                                        | 237             |
| 4            | Nitrogen                        | 737             | Carbon                                  | 216             | Organic matter                                               | 231             |
| 5            | China                           | 733             | Heavy metal                             | 209             | Sediment                                                     | 228             |
| 6            | Management                      | 678             | Water                                   | 208             | Nitrogen                                                     | 212             |
| 7            | Plant                           | 669             | Management                              | 175             | Contaminated soil                                            | 200             |
| 8            | Carbon                          | 642             | Degradation                             | 156             | Plant                                                        | 199             |
| 9            | Climate change                  | 598             | Dynamics                                | 155             | Carbon                                                       | 186             |
| 10           | Sediment                        | 565             | Model                                   | 145             | Agricultural soil                                            | 185             |
| 11           | Contaminated soil               | 553             | Plant                                   | 144             | Degradation                                                  | 166             |
| 12           | Growth                          | 513             | China                                   | 144             | Climate change                                               | 165             |
| 13           | Degradation                     | 501             | Diversity                               | 143             | Accumulation                                                 | 162             |
| 14           | Accumulation                    | 492             | Agricultural soil                       | 141             | Cadmium                                                      | 160             |
| 15           | Model                           | 476             | Contaminated soil                       | 139             | Management                                                   | 159             |
| 16           | System                          | 455             | Microbial community                     | 135             | Land use                                                     | 157             |
| 17           | Dynamics                        | 453             | Sorption                                | 134             | Polycyclic aromatic hydrocarbon                              | 150             |
| 18           | Land use                        | 445             | System                                  | 124             | Adsorption                                                   | 148             |
| 19           | Impact                          | 436             | Sediment                                | 121             | Dynamics                                                     | 141             |
| 20           | Polycyclic aromatic hydrocarbon | 425             | Ecosystem                               | 120             | Contamination                                                | 140             |

国发文数分别为 2365,占 20.13%。中美两国为该领域文章高产国。利用 CiteSpace 软件,对出现频次最高的前 50 个国家的合作情况进行分析,得到如图 3 所示的国家合作网络图谱。除了从图中节点大小反映国家出现频次的高低,还可以通过节点间连线数量,反映两国家间合作关系。发现在该节点阈值的条件下,出现频次最高的中国与其他国家的连线只有 6 条,美国有 8 条,值得注意的是德国在此条件下有 19 条连线,英格兰有 16 条,法国 11 条,说明中国与国际上在该领域有较高文章产出国家的合作研究方面,同德国、英格兰、法国等国家还有差距。

利用 CiteSpace 软件,对中国在国际该领域所发

表的 3269 篇文章的所属机构进行分析。如表 2 所示,可见出现频次最高的为中国科学院 (Chinese Acad Sci),随后依次为西北农林科技大学(Northwest A&F Univ)、北京师范大学(Beijing Normal Univ)、中国农业科学院(Chinese Acad Agr Sci)、浙江大学(Zhejiang Univ)、南京农业大学(Nanjing Agr Univ)与中国农业大学(China Agr Univ)并列第六,南京大学(Nanjing Univ)、中国地质大学(China Univ Geosci)、中国环境科学研究院(Chinese Res Inst Environm Sci)分列第八、九、十名。表明中国科学院与其他高校或研究院所相比,其下属研究所众多,广泛关注该领域的科学问题,成果丰硕。也说明西北农林科技大学、北京师范大学

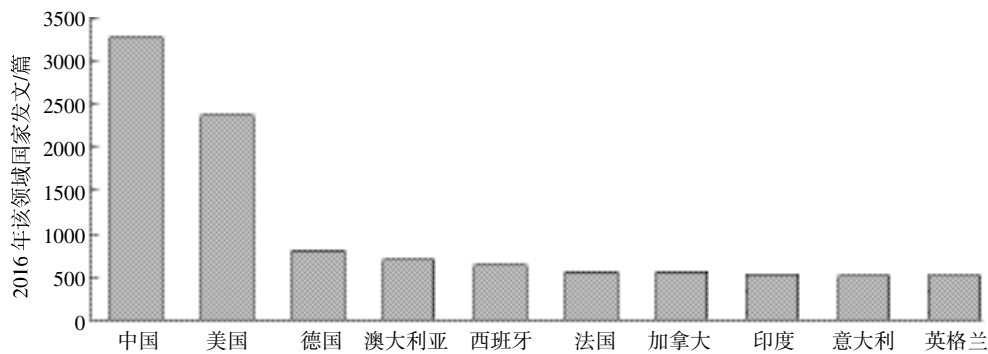


图 2 2016 年国际该领域主要国家发文量

Figure 2 The number of published articles in related fields of major countries in 2016

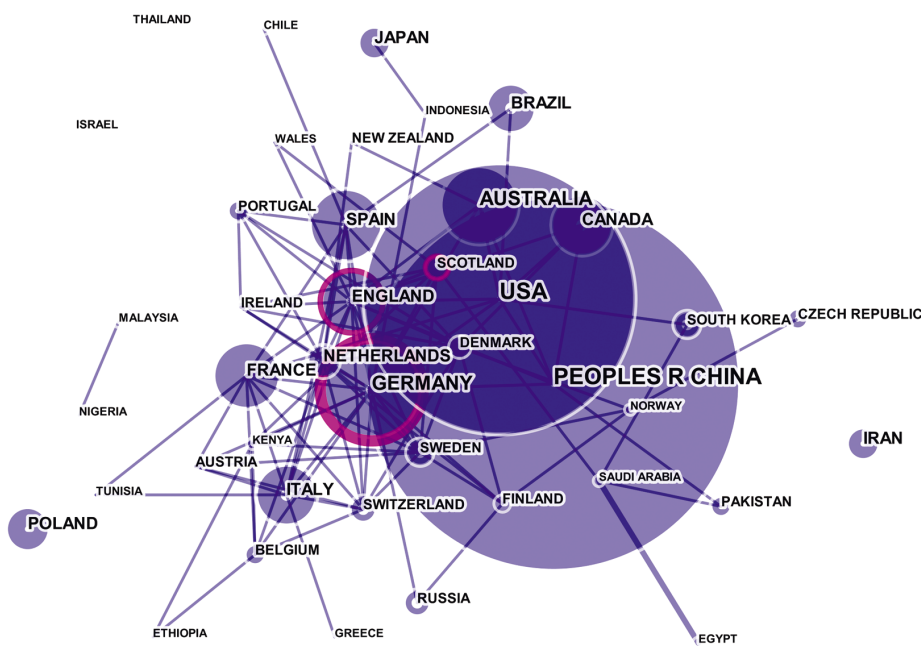


图 3 2016 年国际该领域期刊论文国家合作关系网络

Figure 3 Country collaborative networks of SCI articles in related fields in 2016



表 2 2016 年中国机构国际发文量

Table 2 The number of published international articles in related fields of Chinese institutions

| 序号     | 机构                            | 发文章量              |
|--------|-------------------------------|-------------------|
| Number | Institutions                  | Number of article |
| 1      | Chinese Acad Sci              | 1171              |
| 2      | Northwest A&F Univ            | 193               |
| 3      | Beijing Normal Univ           | 160               |
| 4      | Chinese Acad Agr Sci          | 115               |
| 5      | Zhejiang Univ                 | 112               |
| 6      | Nanjing Agr Univ              | 105               |
| 7      | China Agr Univ                | 105               |
| 8      | Nanjing Univ                  | 93                |
| 9      | China Univ Geosci             | 81                |
| 10     | Chinese Res Inst Environm Sci | 71                |

和中国农业科学院等高校或研究院所在该领域研究成果出色。

从 3269 篇文章的 TOP20 高频关键词列表(表 1 右侧)中发现,中国是出现频次最高的关键词,其余在列表中出现的关键词与国际该领域的相比,有较多词重复出现,说明中国的土壤与环境问题仍是本国相关机构人员的研究重点,在该领域的研究基本与国际保

持一致。还能立足自身特点及需求开展研究,如重金属(Heavy metal)、镉(Cadmium)、累积(Accumulation)、多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbon)等关键词也能反映中国土壤环境问题;碳(Carbon)、氮(Nitrogen)、气候变化(Climate change)等关键词也能体现中国对土壤元素循环及气候变化议题的关注等。

### 2.3 2016 年国内该领域研究方向及研究热点

利用中国知网 CNKI,以“土壤”为主题词检索相关期刊文献,具体检索条件设置:时间范围为 2016 年,文献分类选择环境科学和土壤学,期刊来源类别为核心期刊。一共检索得 2936 条结果(截至 2017 年 1 月 11 日)。将数据导入 CiteSpace 软件,计算分析得到如图 4 所示关键词共现图谱,可划分为 4 个聚类圈:土壤微生物与环境污染、土壤理化性质与水盐运移、土壤有机碳与环境效应、土壤区域环境与空间变异。可以反映该领域中文核心期刊研究动向及关注热点情况。

### 2.3.1 土壤微生物与环境污染

该聚类中出现土壤微生物、土壤酶、土壤酶活性、微生物生物量、微生物群落、群落结构、土壤养分、有机肥、土壤肥力、根际土壤等关键词,反映研究者对

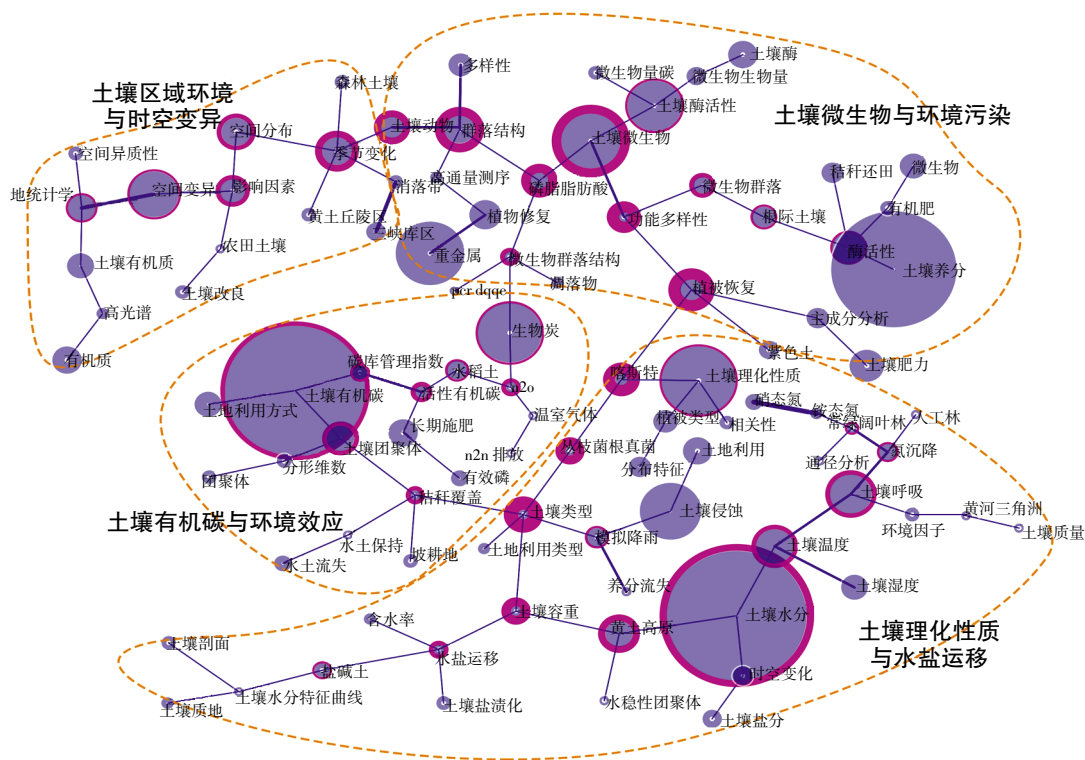


图 4 2016 年国内该领域期刊论文关键词共现关系

Figure 4 Keyword co-occurring networks of internal articles in related fields in 2016

土壤中微生物及其相关影响因素持续关注,也能体现肥料施用等措施带来微生物群落多样性和酶活性改变的研究。如王静娅等<sup>[29]</sup>发现干旱区不同盐生植物群落对土壤微生物群落多样性具有重要影响,其中,梭梭群落的土壤微生物群落具有较强的微生物总体活性和功能多样性;吴云当等<sup>[30]</sup>从微生物、腐殖质和矿物等要素入手,讨论了它们之间的相互关系以及胞外电子传递的途径与方式,从热力学角度探讨了胞外电子传递过程的能量变化,从动力学角度探讨了胞外电子传递的传质与速率等。高通量测序、PCR DGGE、磷脂脂肪酸和主成分分析等关键词的出现,表明现代分子生物学技术及统计方法已广泛用于我国微生物群落结构组成和多样性研究之中<sup>[31-35]</sup>。植物修复、重金属等关键词在此聚类中出现,说明土壤微生物对植物修复土壤重金属污染的影响已受较多关注。崔红标等<sup>[36]</sup>对一次性添加木炭、石灰和磷灰石稳定化修复4年后的土壤进行研究,发现土壤酸度和重金属有效性是影响稳定化修复重金属污染土壤细菌结构多样性差异的主要因素。

### 2.3.2 土壤理化性质与水盐运移

土壤水分为本聚类中最受关注的关键词,土壤理化性质、土壤温度、土壤湿度、土壤容重、土壤质地、土壤水分特征曲线等关键词的出现,体现土壤理化性质是土壤相关领域研究中的一个重要影响因素。张强等<sup>[37]</sup>研究发现干旱区的土壤水汽吸附受多种小气候要素和土壤环境因素共同影响,土壤湿度与水汽吸附之间具有负反馈机制,水汽吸附频率和吸附量具有明显的日和年变化特征;金慧凝等<sup>[38]</sup>以黑土为研究对象,测定其实验室光谱反射率,并提取反射光谱特征指标,建立土壤水分含量高光谱预测模型。土壤盐分、土壤盐渍化、水盐运移、盐碱土、黄土高原等关键词,可以看出相关区域土壤盐渍化研究中水盐运移过程受到较多关注。景宇鹏等<sup>[39]</sup>运用经典统计和主成分分析方法,对河套平原弃耕地盐渍化土壤全盐量、pH、阴阳离子组成、碱化度的分布特征进行了分析,发现研究区土壤为中度至重度盐渍化,土壤全盐、pH、碱化度在剖面中的变化趋势一致,呈表聚和底聚两个过程。王卓然等<sup>[40]</sup>对黄河三角洲地区夏季土壤水盐空间变异进行研究,发现土壤水盐含量总体较高,含盐量以中度盐渍化为主,随着土层深度的增加含盐量呈上升趋势等规律。土壤侵蚀、土地利用、养分流失等关键词表明土壤退化、肥力降低也是亟待解决的土壤问题。该聚类圈中出现的关键词还包括土壤呼吸、氮沉

降、硝态氮、铵态氮、常绿阔叶林、人工林等,表明土壤理化性质结合土壤向环境释放二氧化碳的过程,大气氮沉降及氮素最终形态对森林生态系统的影响是该领域研究热点。向元彬等<sup>[41]</sup>通过野外原位试验,对华西雨屏区常绿阔叶林进行了模拟氮沉降和降雨试验,实验结果显示氮沉降和不同降水量对常绿阔叶林土壤呼吸速率,土壤微生物生物量碳、氮的含量等存在不同影响;周晓兵等<sup>[42]</sup>研究氮素增加对沙漠中3种不同类型生物土壤结皮的影响,发现低浓度氮沉降对结皮生长的影响较小,但是高浓度氮沉降则具有明显的负效应。

### 2.3.3 土壤有机碳与环境效应

该聚类中土壤有机碳、生物炭、活性有机碳、碳库管理指数、温室气体等关键词的出现,表明土壤中有有机形态碳及生物炭、活性炭等类型的碳材料成为研究热点,如生物炭作为一种稳定性碳源,输入土壤后可以提升土壤碳库容量,有较大固碳潜力。康熙龙等<sup>[43]</sup>研究发现旱地土壤施用生物炭,具有保持微生物量稳定且降低土壤有机碳矿化与CO<sub>2</sub>释放的作用;徐刚等<sup>[44]</sup>讨论了不同生物炭处理方式对土壤磷素吸附解吸和形态转化的影响,生物炭对土壤氮素转化中矿化作用、硝化作用和固持作用等关键过程的影响;兰宇等<sup>[45]</sup>利用棕壤肥料长期定位试验,发现化肥、有机肥配施所产生交互效应更有利于棕壤有机碳储量的增加及固碳速率的提高。相关碳材料还能通过抑制N<sub>2</sub>O等温室气体排放,缓解全球气候变化问题。王月玲等<sup>[46]</sup>利用田间小区实验,研究添加果树枝条生物炭后土壤相关碳指标变化情况,发现施用生物炭能提高土壤总有机碳、全氮含量和土壤碳库管理指数,有利于改善土壤质量等;米迎宾等<sup>[47]</sup>发现在两季作物种植结束后,表现出较强的碳汇特征,秸秆还田和单施有机肥的措施可有效减缓因农田土壤CO<sub>2</sub>排放而造成的全球气候变化问题。土壤团聚体、土地利用方式、秸秆覆盖、水土保持、水土流失、坡耕地等关键词体现有机碳投加或秸秆覆盖等措施,可改变土壤有关物理性状,提升土壤团聚体稳定性,有利于水土保持等。该类研究也是热点问题之一。成艳红等<sup>[48]</sup>发现草篱和稻草覆盖对土壤团聚体组成和结合有机碳含量的影响各不相同,但二者结合对改善坡面土壤结构的能力较为稳定。

### 2.3.4 土壤区域环境与时空变异

该聚类图中出现包括空间变异、季节变化、空间分布、空间异质性等与时空变化有关的关键词,表明



在时间和空间尺度上对土壤区域变化的研究为该领域研究热点<sup>[49-50]</sup>。黄土丘陵区、三峡库区、消落带、森林土壤、农田土壤等关键词体现研究者侧重于不同土壤区域环境及土壤类型的研究<sup>[51-52]</sup>。

表3为中文核心期刊该领域TOP20高频关键词列表。土壤有机碳、土壤水分、土壤养分、土壤理化性质、重金属、生物炭、土壤侵蚀、土壤微生物、土壤酶活性、空间变异等关键词表明这些方向是2016年该领域研究热点。同表1相比,有机质、重金属、土壤水分都在三张表格中体现这三种方向是中外研究的热点,也能发现中文相关期刊论文更加关注土壤性质与土壤微生物问题。

表3 2016年国内该领域期刊论文TOP20高频关键词  
Table 3 TOP20 high-frequency keywords in related fields internally in 2016

| 序号 Number | 关键词 Keywords | 频次 Frequency |
|-----------|--------------|--------------|
| 1         | 土壤有机碳        | 152          |
| 2         | 土壤水分         | 151          |
| 3         | 土壤养分         | 136          |
| 4         | 土壤理化性质       | 79           |
| 5         | 重金属          | 75           |
| 6         | 生物炭          | 71           |
| 7         | 土壤侵蚀         | 67           |
| 8         | 土壤微生物        | 65           |
| 9         | 土壤酶活性        | 59           |
| 10        | 空间变异         | 54           |
| 11        | 土壤呼吸         | 47           |
| 12        | 土壤温度         | 41           |
| 13        | 土壤肥力         | 39           |
| 14        | 植物修复         | 36           |
| 15        | 酶活性          | 35           |
| 16        | 季节变化         | 34           |
| 17        | 长期施肥         | 34           |
| 18        | 土地利用         | 33           |
| 19        | 土壤酶          | 33           |
| 20        | 有机质          | 33           |

### 3 结论

本文利用CiteSpace软件,围绕“土壤”这一主题词,分析2016年国际期刊论文及中文核心期刊论文中,属于环境科学及土壤学领域的发展特点、研究热点、合作关系等,也在一定程度上反映了农业环境科学领域关注的一些热点问题。

(1)从该领域发展特点及研究热点上看,土壤污

染与修复、土壤养分循环、土壤微生物群落结构与多样性、土壤与全球气候变化、土壤结构与土壤退化等方面成为当年该领域发展的核心方向,相应研究热点也通过关键词共现图谱及高频关键词列表得以显现。

(2)从国际合作关系上看,中国在该领域研究成果据国际首位,体现我国对土壤相关领域研究的重视,但国际间合作稍显不足。

(3)从国内高校及机构在国际上研究实力上看,中国科学院、西北农林科技大学、北京师范大学和中国农业科学院等在该领域有较高研究产出。

本文数据来源,检索结果筛选方式,研究方法及结果对该领域热点及动向分析有一定启发意义,但因数据检索方式较为单一,结果中传统研究数据量较多,因而无法体现该领域最前沿研究。在今后研究中可重点研究核心关键词制定,在结果中更好地体现学科前沿发展特点。

### 参考文献:

- [1] 宋长青. 土壤科学三十年:从经典到前沿[M]. 北京:商务印书馆, 2016.  
SONG Chang-qing. Development of soil science in the past 30 years: From classic to frontier[M]. Beijing: The Commercial Press, 2016.
- [2] 宋长青. 土壤学若干前沿领域研究进展[M]. 北京:商务印书馆, 2016.  
SONG Chang-qing. Advances in the frontiers of soil sciences[M]. Beijing: The Commercial Press, 2016.
- [3] 陈海滨, 杨禹, 姜维, 等. 基于知识图谱的城市生活垃圾研究前沿分析[J]. 环境卫生工程, 2015, 23(2): 1-5.  
CHEN Hai-bin, YANG Yu, JIANG Wei, et al. Research frontiers of municipal domestic waste based on mapping knowledge domains[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2015, 23(2): 1-5.
- [4] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. *Journal of the American Society for information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359-377.
- [5] 陈悦. 引文空间分析原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 2014.  
CHEN Yue. Principles and applications of analyzing a citation space [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [6] Huang K, Chen C, Zhang J, et al. Efficient arsenic methylation and volatilization mediated by a novel bacterium from an arsenic-contaminated paddy soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(12): 6389-6396.
- [7] Wang P, Menzies N W, Dennis P G, et al. Silver nanoparticles entering soils via the wastewater-sludge-soil pathway pose low risk to plants but elevated Cl concentrations increase Ag bioavailability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(15): 8274-8281.
- [8] Gai K, Hoelen T P, Hsu-Kim H, et al. Mobility of four common mercury species in model and natural unsaturated soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 3342-3351.
- [9] Li H B, Zhao D, Li J, et al. Using the SBRC assay to predict lead relative bioavailability in urban soils: contaminant source and correlation model

- [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(10): 4989–4996.
- [10] Janssen S E, Schaefer J K, Barkay T, et al. Fractionation of mercury stable isotopes during microbial methylmercury production by iron- and sulfate-reducing bacteria[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(15): 8077–8083.
- [11] Li S W, Sun H J, Li H B, et al. Assessment of cadmium bioaccessibility to predict its bioavailability in contaminated soils[J]. *Environment International*, 2016, 94: 600–606.
- [12] Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, et al. Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(8): 4178–4185.
- [13] Mori A S, Isbell F, Fujii S, et al. Low multifunctional redundancy of soil fungal diversity at multiple scales[J]. *Ecology Letters*, 2016, 19(3): 249–259.
- [14] Voort M V D, Kempenaar M, Driel M V, et al. Impact of soil heat on re-assembly of bacterial communities in the rhizosphere microbiome and plant disease suppression[J]. *Ecology Letters*, 2016, 19(4): 375–382.
- [15] Xue K, Yuan M M, Shi Z J, et al. Tundra soil carbon is vulnerable to rapid microbial decomposition under climate warming[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(6): 595–600.
- [16] Zhu N, Yan T, Qiao J, et al. Adsorption of arsenic, phosphorus and chromium by bismuth impregnated biochar: Adsorption mechanism and depleted adsorbent utilization[J]. *Chemosphere*, 2016, 164: 32–40.
- [17] Han Y, Cao X, Ouyang X, et al. Adsorption kinetics of magnetic biochar derived from peanut hull on removal of Cr(VI) from aqueous solution: effects of production conditions and particle size[J]. *Chemosphere*, 2016, 145: 336–341.
- [18] Deary M E, Ekumankama C C, Cummings S P. Development of a novel kinetic model for the analysis of PAH biodegradation in the presence of lead and cadmium co-contaminants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 307: 240–252.
- [19] Kümmel S, Starke R, Chen G, et al. Hydrogen isotope fractionation as a tool to identify aerobic and anaerobic PAH biodegradation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(6): 3091–3100.
- [20] Adrion A C, Nakamura J, Shea D, et al. Screening nonionic surfactants for enhanced biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons remaining in soil after conventional biological treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 3838–3845.
- [21] Yue Y, Ni J, Ciais P, et al. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO<sub>2</sub> flux induced by water erosion in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(24): 6617–6622.
- [22] García-Palacios P, Shaw E A, Wall D H, et al. Temporal dynamics of biotic and abiotic drivers of litter decomposition[J]. *Ecology Letters*, 2016, 19(5): 554–563.
- [23] Simkin S M, Allen E B, Bowman W D, et al. Conditional vulnerability of plant diversity to atmospheric nitrogen deposition across the United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(15): 4086–4091.
- [24] Homyak P M, Blankinship J C, Marchus K, et al. Aridity and plant uptake interact to make dryland soils hotspots for nitric oxide (NO) emissions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(19): E2608–E2616.
- [25] Smith W K, Reed S C, Cleveland C C, et al. Large divergence of satellite and Earth system model estimates of global terrestrial CO<sub>2</sub> fertilization[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(3): 306–310.
- [26] Tian H, Lu C, Ciais P, et al. The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere[J]. *Nature*, 2016, 531(7593): 225–228.
- [27] Wolf S, Keenan T F, Fisher J B, et al. Warm spring reduced carbon cycle impact of the 2012 US summer drought[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(21): 5880–5885.
- [28] Cai Y, Zheng Y, Bodelier P L E, et al. Conventional methanotrophs are responsible for atmospheric methane oxidation in paddy soils[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11728.
- [29] 王静娅, 王明亮, 张风华. 干旱区典型盐生植物群落下土壤微生物群落特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(8): 2363–2372.  
WANG Jing-ya, WANG Ming-liang, ZHANG Feng-hua. Soil microbial properties under typical halophytic vegetation community in arid region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2363–2372.
- [30] 吴云当, 李芳柏, 刘同旭. 土壤微生物-腐殖质-矿物间的胞外电子传递机制研究进展[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 277–291.  
WU Yun-dang, LI Fang-bai, LIU Tong-xu. Mechanism of extracellular electron transfer among microbe humus mineral in soil: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 277–291.
- [31] 林辉, 孙万春, 王飞, 等. 有机肥中重金属对菜田土壤微生物群落代谢的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(11): 2123–2130.  
LIN Hui, SUN Wan-chun, WANG Fei, et al. Effects of heavy metal within organic fertilizers on the microbial community metabolic profile of a vegetable soil after land application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2123–2130.
- [32] 李丽娜, 滕应, 任文杰, 等. 石墨烯施用后对土壤酶活性及土壤微生物群落的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(1): 102–108.  
LI Li-na, TENG Ying, REN Wen-jie, et al. Effects of graphene on soil enzyme activities and microbial communities[J]. *Soils*, 2016, 48(1): 102–108.
- [33] 刘畅, 黄雅丹, 张莹, 等. 培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(11): 4380–4388.  
LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, et al. Effects of bisphenol A on characteristics of paddy soil microbial community under different cultural conditions[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(11): 4380–4388.
- [34] 徐飞, 蔡体久, 杨雪, 等. 三江平原沼泽湿地垦殖及自然恢复对土壤细菌群落多样性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7412–7421.  
XU Fei, CAI Ti-jiu, YANG Xue, et al. Effect of cultivation and natural restoration on soil bacterial community diversity in marshland in the Sanjiang Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7412–7421.
- [35] 张慧慧, 李春荣, 王文科, 等. 高通量测序助力地质封存 CO<sub>2</sub> 泄漏情景下土壤细菌群落信息的挖掘[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12): 2440–2448.  
ZHANG Hui-hui, LI Chun-rong, WANG Wen-ke, et al. Study on soil bacterial community under sealed CO<sub>2</sub> leakage scenarios by high-throughput sequencing technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2440–2448.
- [36] 崔红标, 范玉超, 周静, 等. 改良剂对土壤铜镉有效性和微生物群

- 落结构的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 197–205.
- CUI Hong-biao, FAN Yu-chao, ZHOU Jing, et al. Availability of soil Cu and Cd and microbial community structure as affected by applications of amendments[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(1): 197–205.
- [37] 张强, 王胜, 王闪闪, 等. 半干旱区土壤水汽吸附的影响因素及变化特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(11): 1515–1527.
- ZHANG Qiang, WANG Sheng, WANG Shan-shan, et al. Influence factors and variation characteristics of water vapor absorption by soil in semi-arid region[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 46(11): 1515–1527.
- [38] 金慧凝, 张新乐, 刘焕军, 等. 基于光谱吸收特征的土壤含水量预测模型研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 627–635.
- JIN Hui-ning, ZHANG Xin-le, LIU Huan-jun, et al. Soil moisture predicting model based on spectral absorption characteristics of the soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 627–635.
- [39] 景宇鹏, 段玉, 妥德宝, 等. 河套平原弃耕地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1410–1420.
- JING Yu-peng, DUAN Yu, TUO De-bao, et al. Characteristics of salinization of deserted farmland in Hetao Plain, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1410–1420.
- [40] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1040–1049.
- WANG Zhuo-ran, ZHAO Geng-xing, GAO Ming-xiu, et al. Spatial variation of soil water and salt and microscopic variation of soil salinity in summer in typical area of the Yellow River Delta in Kenli County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1040–1049.
- [41] 向元彬, 黄从德, 胡庭兴, 等. 模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5227–5235.
- XIANG Yuan-bin, HUANG Cong-de, HU Ting-xing, et al. Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil respiration in an evergreen broad-leaved forest in a rainy region of Western China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5227–5235.
- [42] 周晓兵, 尹本丰, 张元明, 等. 模拟氮沉降对不同类型生物土壤结皮生长和光合生理的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3197–3205.
- ZHOU Xiao-bing, YIN Ben-feng, ZHANG Yuan-ming, et al. The effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthetic physiology of three types of biocrusts[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3197–3205.
- [43] 康熙龙, 张旭辉, 张硕硕, 等. 旱地土壤施用生物质炭的后效应: 水分条件对土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 152–158.
- KANG Xi-long, ZHANG Xu-hui, ZHANG Shuo-shuo, et al. Effects of biochar application history on soil: Effect of moisture regime on dynamics of soil organic carbon mineralization[J]. *Soils*, 2016, 48(1): 152–158.
- [44] 徐刚, 张友, 武玉, 等. 生物炭对土壤中氮磷有效性影响的研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2016, 46(9): 1085–1090.
- XU Gang, ZHANG You, WU Yu, et al. Effects of biochar application on nitrogen and phosphorus availability in soils: A review[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2016, 46(9): 1085–1090.
- [45] 兰宇, Muhammad I A, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤有机碳储量及固碳速率的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 264–270.
- LAN Yu, Muhammad I A, HAN Xiao-ri, et al. Effect of long-term fertilization on total organic carbon storage and carbon sequestration rate in a brown soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1): 264–270.
- [46] 王月玲, 耿增超, 尚杰, 等. 施用生物炭后壤土土壤有机碳、氮及碳库管理指数的变化[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 532–539.
- WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, SHANG Jie, et al. Soil organic carbon and nitrogen and carbon pool management index in Loess soil as influenced by biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 532–539.
- [47] 米迎宾, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同管理措施对滨海盐渍农田土壤CO<sub>2</sub>排放及碳平衡的影响[J]. 土壤, 2016, 48(3): 546–552.
- MI Ying-bin, YANG Jin-song, YAO Rong-jiang, et al. Effects of different managements on CO<sub>2</sub> emission and carbon balance in coastal saline soils[J]. *Soils*, 2016, 48(3): 546–552.
- [48] 成艳红, 武琳, 孙慧娟, 等. 稻草覆盖和香根草篱对红壤水稳性团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3518–3524.
- CHENG Yan-hong, WU Lin, SUN Hui-juan, et al. Effects of straw mulching and vetiver grass hedgerows on the size distribution of the soil water stable aggregates and aggregate-associated organic carbon in red soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3518–3524.
- [49] 孙敏敏, 王旭峰, 马明国, 等. 黑河中游植被生长季土壤呼吸和净生态系统碳交换量的季节变化[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1191–1201.
- SUN Min-min, WANG Xu-feng, MA Ming-guo, et al. Seasonal variation of soil respiration and net ecosystem carbon exchange during vegetation growing season in the middle reaches of the Heihe River[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1191–1201.
- [50] 吴敏, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1619–1627.
- WU Min, LIU Shu-juan, YE Ying-ying, et al. Spatial variability of surface soil organic carbon and its influencing factors in cultivated slope-sand abandoned lands in a Karst peak-cluster depression area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(6): 1619–1627.
- [51] 冉小萌, 蒋珍茂, 何明靖, 等. 外源磷在三峡库区典型土壤中的活性演变及形态转化[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1249–1261.
- RAN Xiao-meng, JIANG Zhen-mao, HE Ming-jing, et al. Variation of extraneous phosphorus in activity and morphology in soils typical of the three gorges reservoir area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1249–1261.
- [52] 柴雪思, 雷利国, 江长胜, 等. 三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨[J]. 环境科学, 2016(8): 2979–2988.
- CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, et al. Characteristics and influencing factors of soil microbial biomass carbon and nitrogen in drawdown area in the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016(8): 2979–2988.