DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.05.021

赵楚, 白义鑫, 刘树西, 等. 基于文献计量分析的土壤表面电化学发展脉络研究. 土壤, 2021, 53(5): 1048-1056.

基于文献计量分析的土壤表面电化学发展脉络研究

赵 楚^{1,3}, 白义鑫^{1,3}, 刘树西^{1,3}, 盛茂银^{1,2*}

(1 贵州师范大学喀斯特研究院,贵阳 550001; 2 国家喀斯特石漠化治理工程技术研究中心,贵阳 550001; 3 贵州省喀斯特石漠化防治 与衍生产业工程实验室,贵阳 550001)

摘 要:为了全面深入了解全球土壤表面电化学研究进展及发展趋势,本文基于 Web of Science 核心合集数据库并利用其自带的分析工具和 CiteSpace 可视化分析软件,从该学科的发文量及时间特征、合作研究空间特征、共观网络特征、共被引图谱和发展特征 5 个方面对 1995—2019 年发表的土壤表面电化学文献进行计量分析。结果表明:美国、中国和法国在本领域的发文量居前三,而中介中心性则表明法国、美国和英国位列三甲,我国位于第六位且表现出上升趋势。基于引文的突发性关键词检测表明"阳离子交换(cation exchange)"、"系统(system)"和"络合作用(complexation)"是近十年来的研究热点;文献共被引聚类分析表明生物质炭对土壤改良、黏土层间电荷与罗丹明 6G 的相互作用、表面电位变化对胶体吸附解吸影响是领域内的研究重点;生物质炭对土壤的改良、带电粒子在双电层中的相互作用机制、土壤黏土矿物表面的水动力特征是本领域研究的前沿问题。

关键词: 土壤; CiteSpace; 表面电化学; 可视化分析; 网络分析

中图分类号: S153.2; G353.1 文献标志码: A

Bibliometric-based Analysis of Advances in Researches on Soil Surface Electrochemistry

ZHAO Chu^{1,3}, BAI Yixin^{1,3}, LIU Shuxi^{1,3}, SHENG Maoyin^{1,2*}

(1 Institute of Karst Research, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2 National Engineering Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guiyang 550001, China; 3 Guizhou Engineering Laboratory for Karst Rocky Desertification Control and Derivative Industry, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to fully understand the progresses and development trends of global soil surface electrochemical research, in this paper, based on web of science core collection database and CiteSpace visual analysis software, soil surface electrochemistry literatures published from 1995 to 2019 were quantitatively analyzed from five aspects: the quantity and time characteristics of the subject, the spatial characteristics of cooperative research, the characteristics of co-occurrence network, the co-citation map and the development characteristics. The results showed that the United States, China and France ranked among the top three in the number of papers published, while the intermediary centrality showed that France, the United States and the United Kingdom were in the top three, and China was in the sixth place with an upward trend. The burst keyword detection based on citations indicated that the "cation exchange", "system" and "complexation" have been the research hotspots in recent ten years. The literature co-citation cluster analysis showed that biochar on soil improvement, the interaction between clay interlayer charge and Rhodamine 6G, surface potential change, colloid adsorption and desorption were the research focuses in the field; the improvement of soil by biochar and the interaction mechanism of charged particles in the double electric layer, and the hydrodynamic characteristics of soil clay mineral surface were the frontier issues in this field.

Key words: Soil; CiteSpace; Surface electrochemistry; Visual analysis; Network analysis

土壤电化学(soil electrochemistry)是研究土壤中 带电质点(胶粒、离子、质子和电子)之间的相互作用 及其化学表现的科学^[1]。土壤表面电化学(soil surface electrochemistry)以土壤胶体表面发生的电能与化学

①基金项目:贵州省科学技术基金项目(黔科合基础[2019]1224号)、贵州省优秀青年科技人才支持计划项目(黔科合平台人才[2017]5638) 和贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726号)资助。

^{*} 通讯作者(shmoy@163.com)

作者简介:赵楚(1996—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向为土壤电化学。E-mail: 84522965@qq.com

能的相互转化过程为主要研究内容,从而揭露电荷 质点间相互作用的本质^[2]。由于其深刻影响到土壤 中离子和分子的吸附与解吸、营养元素的赋存及迁 移、水力特性等变化的一系列物理、化学反应,而 备受关注^[3-5]。当前,农业集约化发展对土壤可持续 利用和生态环境保护带来巨大压力,故而土壤改良和 修复的迫切需要使得土壤表面电化学发展面临机遇 与挑战。我国对土壤表面电化学的系统研究开世界之 先河,且较为完备和深入。近年来,国内外涌现出一 批土壤表面电化学研究团队^[6-7]。虽然早年相关学者 对中国该领域的发展历程进行了综述^[8],但目前尚未 有相关文献对该领域的国内外发展脉络、研究现状、 前沿热点等进行归纳总结。

文献计量学(bibliometrics)是以文献系统与文 献计量关系为研究对象,基于文献的大数据分析, 探讨科学技术动态特征,预测未来发展趋势的一门 学科^[9]。CiteSpace 是一款用于文献识别并将潜在信 息进行可视化的软件,在揭示科学领域的发展方向及 研究前沿等方面独具优势,近年来在农业、林业、医 学、社会学、生态学等领域被广泛应用并取得相应成 果^[10-12]。本文基于 Web of Science 核心合集数据库 1995-2019年8月的土壤表面电化学领域相关文献, 利用 CiteSpace 可视化软件从国内外发文量变化趋 势、合作研究空间特征、研究共现网络特征、共被引 图谱等多个角度进行计量分析,并基于关键词时间图 谱分析归纳土壤表面电化学的不同研究阶段,以期为 土壤表面电化学领域的研究者呈现知识图谱和学科 发展脉络,并引出该领域当前的研究热点和未来的研 究方向。

1 材料与方法

1.1 数据来源

为确保研究结果的可靠性与科学性,将科睿唯安 (Clarivate Analytics)的 Web of Science (WoS) 核心合 集数据库作为文献信息获取的渠道,并设置主题词 (TS)为"((soil or clay or soil colloid) and (surface) and (charge or electrochemistry) NOT (nano and composite*))"将文献来源主题锁定为土壤表面电化 学,并排除纳米材料及其他聚合物的表面化学研究文 献。选取 Web of Science 核心合集的 Science Citation Index Expanded (SCI-Expanded)及 Social Sciences Citation Index (SSCI) 作为文献索引的子数据库,时 间跨度为 1995—2019 年,文献类型为 Article 和 Review,检索时间为 2020 年 10 月 13 日,共检索出 4 763 篇相关研究文献,导出的文献记录内容为"全记录与引用的参考文献",格式为"纯文本",最后将下载好的文献改为 download_X.txt 格式,以便 Citespace 软件识别。

1.2 研究方法

利用 WoS 数据库自带的文献分析功能得到国内 外土壤表面电化学领域的发文量及发文趋势,并通过 Origin 2018 软件呈现。将格式化之后的文本文件通 过 data 键导入 CiteSpace 软件,选择 WoS 中的 Remove Duplicates 进行去重,处理后的数据文件呈现在 output 文件夹中,回到主界面将其导入 Citespace。 Timeslicing 设置为 1995-2019年,时间切片为1年, 通过点击软件 Node types 中的 Author、Institution、 Country, 分别得到土壤表面电化学领域文献作者、 机构和国家的合作网络,点击 Node types 中的 Keyword、Category,其他设置不变,则分别得到关 键词和学科领域的共现网络。上述操作在 Pruning 中 均选择 Pathfinder(寻径网格)、Pruning sliced networks(修剪切片网络)和 Pruning the merged network(修剪合并网络),以便更好地呈现节点类型的 共线关系,设置完成后点击 Go 进入可视化界面,通 过控制面板参数及节点位置调整对图谱进行美化。

1.3 指标计算说明

Burst Detection 表示突发性检验,用来表示变量 在短时间内的变化程度,在 CiteSpace 软件中,这种 突变信息被作为解释变量深层次变化的手段,表明指 标在短时间内引起了高度重视。

Sigma 值在共被引网络中是基于中心性和突现 性计算得到的,中心性和突现性越高的节点,其 Sigma 值也越高,表示该点在结构上和引文变化中越 重要。

Betweenness centrality 表示中介中心性,其值超过 0.1 的点被称为关键节点,在 CiteSpace 中该点所代表 的文献通常被认为是连接两个不同领域的关键,其值越 高说明对网络传输的影响越大,本文用该指标衡量和发 现土壤表面电化学领域的重要研究者、论文及机构。

Modularity 表示聚类模块值,用符号 *Q* 表示, 一般认为 *Q*>0.3 表明聚类结构显著。

Silhouette 表示聚类平均轮廓值,用符号 *S* 表示, *S*>0.5 表明聚类合理,*S*>0.7 表明聚类结果令人信服^[13]。

2 结果与讨论

2.1 土壤表面电化学研究发文数量及时间特征

发文数量可以在一定程度上表明该学科的发展

壤

水平、速度及被关注度。通过对土壤表面电化学领域 1995-2019 年世界及中国 SCI 论文发表量(图 1)分析 可知,世界与中国研究者的发文量总体呈波动上升趋 势,二者发文量在 2013 年以前每年波动变化幅度不 大,自2012—2015年开始进入迅速上升阶段,其中中 国 2012 年土壤表面电化学领域 SCI 发文量为 32 篇, 世界为195篇,中国占比为16.4%,2013年中国发文 量为 54 篇,世界为 239 篇,中国占比上升至 22.6%, 故而世界土壤表面电化学领域 SCI 发文量受到中国该 领域 SCI 发文量的深刻影响。而中国发文量变化则主 要受宏观政策的影响,例如 2012 年十八大报告将生态 文明建设放在突出位置,全文提到"环境"或"生态" 字眼的地方达 45 处, 2013 年国务院办公厅出台《关 于印发近期土壤环境保护和综合治理工作安排的通 知》,2016年国务院印发了《土壤污染防治行动计划》。 近年来出台的一系列政令有效推动了土壤改良及污染 修复方面研究工作的开展,也使得土壤表面电化学领 域在此期间 SCI 发文快速增长,并对世界该领域的研 究产生重要影响。



图 1 1995—2019 年土壤表面电化学领域年度发文量 Fig. 1 Quantity of publications on soil surface electrochemistry from 1995 to 2019

2.2 土壤表面电化学研究的合作研究空间特征

各个国家、机构及学者基于学术联系而产生合作 并由此形成共线关系,在 CiteSpace 可视化功能中可 通过网络图谱较好地呈现此共性关系。利用 Citespace 分析形成的国家、机构及学者合作网络图谱能清晰地 识别多者的合作关系,同时可评价国家、机构和学者 的学术影响力。

图 2 呈现的是基于土壤表面电化学领域研究的 各国合作网络关系,图中有 51 个节点,表明有 51 个不同的国家涉及土壤表面电化学领域的研究。其 中,法国(0.30)、美国(0.28)和英国(0.15)的中介中心 性位居前3,表明该3国在国家合作网络中占有重要 地位。在发文量方面,美国(1007篇)、中国(837篇)、 法国(361篇)排在前3列,英国(142篇)发文量虽居第 9位,但其中介中心性较高,深入分析得知该国在土 壤表面电化学领域研究较早,但每年发文量较少,文 章质量较高且与其他各国合作研究较为频繁,故而具 有较高的影响力。值得注意的是,我国在土壤表面电 化学领域的中介中心性(0.08)在世界各国中居第6 位,这是由于我国以水稻土研究为主,而该土壤主要 分布在我国亚热带季风气候区,故而与国外在土壤研 究对象上存在差异,因此减少了合作机会。未来中国 科研团队应立足国情,积极寻求在不同土壤类型的同 一研究方面加深与他国的合作研究,以进一步加强中 国土壤表面电化学领域在世界上的影响力。



(图中节点的圆形半径大小与累计发文量呈正相关,年轮颜色代表发文年限,由灰至红表明发文年限由老至新,节点之间的连线表示二者的共现或共被引关系,粗细表示联系的强弱;下同)
图 2 土壤表面电化学研究的国家合作网络

Fig. 2 International cooperative network of research on soil surface electrochemistry

通过对机构合作网络的分析能够客观评价机构 的科研水平与发展潜力。图 3 展示的是土壤表面电化 学领域研究机构的合作特征,图中节点为 439 个,连 线数量为 405,表明全球有 439 个机构开展科研合作。 发文量最多的前 3 个机构分别是中国科学院大学 (287 篇)、法国国家科学研究中心(49 篇)、西南大学 (42 篇)。从图 3 中可以看出,中国科学院大学的节点 最大,与其他科研机构的连线较为密集,且与国内高 校连线更粗,中介中心性(0.44)最高,表明中国科学 院在土壤表面电化学领域的发文量最多,研究处于世 界前列,与国内的西南大学、浙江大学、华中农大等 高校的合作更为密切,同时与国外的波兰科学院、澳 大利亚的西澳大学等保持学术联系。国外联系较为紧 密的机构为波兰科学院、斯洛伐克科学院和加拿大的 阿尔伯塔大学,三者在合作网络上呈组团分布。

通过对合作网络中研究者的分析能发现科学领域 中的优秀研究人员及其合作关系,本研究利用 CiteSpace 对研究者的分析中显示有 773 个节点,表明 773 位研究者参与土壤表面电化学的研究并发表 SCI 论文。图 4 为土壤表面电化学领域研究者合作网络,发 文量前 3 位研究人员均来自中国,分别为徐仁扣(59 篇)、李航(28 篇)和姜军(27 篇),图中最大节点显示为 中科院南京土壤所徐仁扣研究员,且与国内其他研究人 员之间的连线密度较大,表明其是国内土壤表面电化学 研究领域的领军人物,而图中国外研究人员网络分布呈 现小范围的组团式分布,研究人员在小范围进行独立科 学研究,团队之间合作较少,许多研究人员以小范围独 立研究为主,团队合作较少。773 位研究者的中介中心 性仅有 6 位为 0.1,其余均为 0,其中 5 位来自中国分 别是李航、姜军、洪志能、周东美和汪登俊,国外学者 为 Sarkar Binoy,造成这一现象的主要原因可能是发文 量较大的研究者的 SCI 论文大都是自己为第一作者或 通讯作者,使得其对其他节点的影响较小所致。

2.3 土壤表面电化学研究的共现网络特征

CiteSpace 中对于学科的共现分析可以构建学科 之间的关联网络,有利于分析土壤表面电化学研究这 一领域涉及的学科交叉情况。图 5显示土壤表面电化 学领域学科共现网络,图中有 22个节点,表明土壤 表面电化学中有 22个学科交叉渗透,34条表明学科



图 3 土壤表面电化学的机构合作特征

Fig. 3 Features of the cooperative network of research on soil surface electrochemistry between institutions





Fig. 4 Cooperative network of research on soil surface electrochemistry between authors

壤

间相互相联系的连线,表明土壤表面电化学涉及的领域 广泛,研究内容复杂。该领域主要涉及化学、物理学、 环境科学和生态学等,这些方面的发文量较高,其中与 矿物学、土壤学和植物学的中介中心性较高,分别为 0.99、0.93 和 0.37,表明这些学科知识对于土壤表面电 化学研究具有重要价值,与学科间联系紧密。

文章关键词是文章研究内容的高度凝练,基于 CiteSpace 对土壤表面电化学领域 SCI 论文的关键词 进行共现分析有助于认识该领域研究方向的变化情 况。图 6 呈现的是土壤表面电化学关键词共现网络, 依据图形大小可识别出"吸附作用(adsorption)""土 壤(soil)""吸附(sorption)""蒙脱石(montmorillonite)" "黏土(clay)"为出现频次最高的关键词,其出现次数分别为1286、650、634、602和551。中介中心性最高的10个关键词分别为"土壤(soil)""电荷(charge)""机制(mechanism)""磷酸盐(phosphate)""吸附(sorption)""高岭石(kaolinite)""蒙脱石(montmorillonite)""表面(surface)""有机质(organic matter)"和"离子强度(ionic strength)"。分析上述10个关键词发现,有机质是土壤有机胶体的主要来源,蒙脱石和高岭石属于土壤硅酸盐黏土矿物,即无机胶体的范畴,表面电荷是研究吸附作用的关键指标,故而土壤表面电化学领域研究的关键聚焦于不同类型土壤胶体的吸附作用。



图 5 土壤表面电化学学科共现网络

Fig. 5 Co-occurrence network of soil surface electrochemistry related disciplines





Fig. 6 Co-occurrence network of key words in papers on soil surface electrochemistry

CiteSpace 中的突发性检测(burst detection)可以 用来表示关键词在特定时间内产生的巨大影响,故而 对关键词进行突发性检测可以获知某时间段内的研 究热点。表1列举了土壤表面电化学领域1995—2019 年及 2010—2019 年两个时间段内突发强度值由高至 低的前 15 个突发性关键词,其中起始和结束时间表 明了该关键词在此时间段内是研究领域的热点和重 点。从表 1 可知,金属"铝(aluminum)"的突发性 最高,突发强度为18.91(表1),说明在土壤表面电化 学领域中,土壤表面与铝的交互作用在1995—2019 年间是该领域研究的最大热点,其突发时间从20世 纪末至21世纪初。进入21世纪后"电解质 (electrolyte)""电荷特性(charge characteristics)""磷 酸盐(phosphate)"等关键词的热度开始凸显。为了更 好地把握土壤表面电化学领域的当前热点,对2010 —2019年,即近10年的研究热点进行了进一步的统 计(表2),其中"阳离子交换(cation exchange)"是土 壤表面电化学领域近10年来的重要研究方向,突发 强度为8.83,其次分别是"系统(system)""络合作用 (complexation)""温度(temperature)""比表面(surface area)"等突发性关键词。从关键词变化情况来看,该领域的研究热点开始从以单一物质的吸附特性研究 深入到离子交换的机理方面,例如 2010 年以前的研究热点多为"铝(aluminum)""钙(calcium)""铁(iron)"等金属以及"伊利石(illite)""蛭石(vermiculite)"等 黏土矿物,2010 年后则转变为"阳离子交换(cation exchange)""络合作用(complexation)""比表面(surface area)"等。值得关注的是"大肠杆菌(*Escherichia coli*)"作为研究热点出现在 2010—2012 年间,这表明土壤 表面与细菌的相互作用也成为这一时期的研究热点。

表 1 关键词突发性检测 Table 1 Burst detection of key words

1995—	2010—2019 年						
关键词	突发强度	起始时间	结束时间	关键词	突发强度	起始时间	结束时间
铝(aluminum)	18.91	1995	2004	阳离子交换(cation exchange)	8.83	2010	2011
钙(calcium)	8.73	1995	2004	系统(system)	7.51	2011	2014
阴离子吸附(anion adsorption)	8.58	1995	2000	络合作用(complexation)	6.22	2010	2011
铁(iron)	7.11	1995	2008	温度(temperature)	6.04	2010	2013
伊利石(illite)	6.82	1996	2002	比表面(surface area)	5.80	2011	2012
电解质(electrolyte)	6.15	1995	2001	离子吸附(ion adsorption)	5.70	2010	2011
水界面(water interface)	5.14	1995	2003	基线(base line)	5.69	2010	2011
降雨(precipitation)	4.90	1995	2003	光谱学(spectroscopy)	5.57	2010	2014
电荷(charge)	4.72	1995	1996	电荷分布(charge distribution)	4.67	2010	2011
双电层(electrical double layer)	4.29	1995	2010	染料(dye)	4.66	2010	2011
电荷特性(charge characteristics)	3.88	1995	1996	大肠肝菌(Escherichia coli)	4.45	2010	2012
物质(substance)	3.87	1995	1999	化学(chemistry)	3.90	2010	2013
磷酸盐(phosphate)	3.78	1995	2005	腐殖质(humic substance)	3.86	2010	2012
蛭石(vermiculite)	3.56	1995	2003	层间电荷(layer charge)	3.56	2011	2012
合成锂皂石(laponite)	3.40	1995	1999	离子吸附(ion adsorption)	3.27	2010	2011

2.4 土壤表面电化学研究的共被引图谱

在文献计量学中,文献共被引是指两篇不同的文 献同时被第三篇文章引用,则被引用的两篇文章存在 共被引关系^[14],这种现象出现的频率越高,则说明 两篇文章的学术关联越密切,以此可以发现具有较高 参考价值的文献,通常这类文献代表该领域研究的重 点及热点。土壤表面电化学文献共被引图谱如图 7 所示,图谱由 576 个节点和 1 103 条线条和较大的 21 个群组聚类组成,*Q*=0.902 9 > 0.3,表明聚类结构显 著。图中 21 个聚类群组标签代表土壤表面电化学研 究的 18 个研究前沿(由于土壤表面电化学领域对矿 物的研究者较多且较为分散,使得共被引矿物标签重 复 3 次,呈现 3 个组群,即#16、#18、#20)。研究中 排名前 3 的聚类组群为#0 生物质炭(biochar)、#1 罗 丹明 6G(rhodamine 6G)、#2 表面电位(surface potential),文章数量分别为 49、47、42 篇, *S* 值分 别为 0.983、0.983 和 0.958,表明这 3 个族群聚类结 果具有较高的可信度,这 3 个聚类群组代表土壤表面 电化学研究的重点,即剖析生物质炭表面电化学效 应,研究其土壤改良的机理;胶体表面对阳离子有机 染料罗丹明 6 G 的吸附过程及机理研究;表面电位变 化对土壤胶体及其吸附物交互作用的影响。

Sigma 值在 CiteSpace 中是综合评价文献中介 中心性和突发值的指标,可将其用来判别研究领域 的前沿与重点问题^[15]。对前 3 个聚类中影响力较大 的文献进行剖析,其中#0 生物质炭中 Sigma 值最 高的为中科院南京土壤研究所 Yuan 等^[16]发表的论 文"The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures",该文采用农 作物秸秆制备生物质炭,在缓解土壤酸化方面效果 显著;#1 罗丹明 6G 中斯洛伐克科学院无机化学研 究所的 Bujdák Juraj 教授对有机染料罗丹明 6G 与 黏土矿物的相互作用的相关研究进行了综述^[17],论 证了黏土矿物层间电荷对有机染料分子的聚集具 有控制作用;#2 表面电位中 Sigma 值最高的论文 为美国犹他大学矿业与地球科学学院 Gupta Vishal 教授发表的论文"Particle interactions in kaolinite suspensions and corresponding aggregate structures",该文表示 pH 对高岭石颗粒的硅氧烷表面和 氧化铝表面的表面电荷密度产生重要影响,且这种 影响是通过不同 pH 条件下硅铝表面的相互作用得 以实现的^[18]。



图 7 土壤表面电化学文献共被引图谱 Fig. 7 Graph of co-citation of papers on soil surface electrochemistry

对排名前3的聚类群组中的重要文献进行总结分 析,其主要研究内容如表2所示。为了进一步剖析土 壤表面电化学研究领域的研究进展,对21个聚类组群 涉及的近10年相关文献进行筛选,选出Sigma值最 高的10篇文章,其结果如表3所示。Sigma值最高的 文献同之前列举的#2表面电位聚类群组中Sigma值最 高的论文,即"Particle interactions in kaolinite suspensions and corresponding aggregate structures",表 明该文在土壤表面电化学领域近期发展过程中具有重 要的导向作用,应当引起高度关注。2008年发表的论 文"Electrical double layers' interaction between oppositely charged particles as related to surface charge density and ionic strength"主要研究带电颗粒表面双电 层中的相互作用^[19]。而"Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review"、

"The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures" 等 4 篇文章则是主要 研究生物质炭的表面电化学属性,论证其作为土壤改 良剂的可行性^[16, 20-22]。此外"Structure and dynamics of

water at a clay surface from molecular dynamics simulation"、"Water dynamics in hectorite clays: infuence of temperature studied by coupling neutron spin echo and molecular dynamics"等4篇论文则是主要研究土壤黏土矿物表面的水动力特征^[23-26]。

3 结论

基于 CiteSpace 软件对土壤表面电化学研究文献 的国家、研究机构、作者、关键词、被共引文献等进 行共现分析, 剖析了该领域的优秀科研人员、研究重 点、热点和前沿,结果表明,美国、法国和中国在此 领域占有重要地位, 三者拥有学科内优秀的科研机 构,包括美国的密西根州立大学、法国的国家科学研 究中心以及中国的中国科学院、西南大学、华中农业 大学、南京大学等, 以中国拥有的学科内优秀机构最 多;世界上在该领域发表论文最多的前三位研究者均 来自中国,以南京土壤研究所的徐仁扣研究员发文量 最多, 其主要研究方向为根/土界面的电化学特征和 红壤酸化阻控;土壤表面电化学研究涉及多个交叉学 科,与化学、环境工程、工学的联系最为密切;目前 学科发展的热点问题为生物质炭在土壤改良中的应 用、土壤与污染物的互作和土壤胶体的表面电位,学 科重点和前沿问题为生物质炭与土壤界面的交互作 用、土壤黏土矿物表面的水动力特征、带电颗粒表面 双电层的相互作用3个方面。

	表 2	土壤表面电化学研究聚类分析主要内容
Table 2	Main contents	of the cluster analysis of papers on soil surface electrochemistry

组群编号	组群专题	主要研究内容
#0	生物质炭	农作物秸秆产生的生物质炭表面的羧基和羟基对其碱性具有较大贡献率,其可作为酸性土壤的改良剂 ^[16] ;生物质炭对不同组分的表面吸附与分配效应,土壤中施用生物质炭可以增强其大气中二氧化碳的固存作用 ^[21] ; 生物质炭具备较强的表面吸附能力,使得其作为土壤中金属污染物或有机物的有效吸附剂 ^[22]
#1	罗丹明 6G	黏土矿物与阳离子有机染料罗丹明 6G 之间的相互作用使生色团的光学、光谱和化学性质发生显著变化,黏 土矿物的层间电荷敏感地控制着染料分子的聚集 ^[17] ;阳离子染料罗丹明 6G 在黏土分散体中的聚集效应及其 对不带电有机物的吸附机理研究 ^[27] ;有机染料罗丹明 6G 被锂皂石黏土矿物吸附的过程 ^[28]
#2	表面电位	对硅氧烷和氧化铝的表面电荷进行研究,二者间的相互作用对高岭石颗粒悬浮液的流变性起重要作用 ^[18] ;系 统地研究了 Al/Si 和 Mg/Al 置换的蒙脱石的硅氧四面体和硅氧八面体结构模型,以量化这种置换对其膨胀行为、层间结构和悬浮液流动性的影响 ^[26] ;黏土矿物层中羟基的排列不同,使得吸附表面的络合物及水分子结构产生差异 ^[29]

Table 3 Top 10 sigma values of literatures on soil surface electrochemistry in recent 10 years						
Sigma 值	标题	发表年份				
3.15	Particle interactions in kaolinite suspensions and corresponding aggregate structures	2011				
2.93	Electrical double layers' interaction between oppositely charged particles as related to surface charge density and ionic strength	2008				
2.70	Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review	2014				
2.51	The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues atdifferent temperatures	2011				
2.24	Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures	2008				
1.85	Structure and dynamics of water at a clay surface from molecular dynamics simulation	2008				
1.79	Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine	2009				
1.62	Water dynamics in hectorite clays: Influence of temperature studied by coupling neutron spin echo and molecular dynamics	2011				
1.54	Hydration properties and interlayer organization of water and ions in synthetic Na-smectite with tetrahedral layer charge. Part 2. Toward a precise coupling between molecular simulations and diffraction data	2011				
1.48	Structural arrangements of isomorphic substitutions in smectites: Molecular simulation of the swelling properties, interlayer structure, and dynamics of hydrated Cs-montmorillonite revisited with new clay models	2014				

表 3 近 10 年土壤表面电化学研究 Sigma 值前 10 位文献

参考文献:

- [1] 于天仁. 土壤电化学的建立与发展[J]. 土壤, 1999, 31(5): 231-235,254.
- [2] 马任甜,胡斐南,刘婧芳,等.黄土高原植被恢复过程 中土壤表面电化学性质演变特征[J].土壤学报,2020, 57(2):392-402.
- [3] Utkaeva V F. Specific surface area and wetting heat of different soil types in European Russia[J]. Eurasian Soil Science, 2007, 40(11): 1193–1202.
- [4] Jiang X, Ma Y, Yuan J, et al. Soil particle surface electrochemical property effects on abundance of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing Archaea, NH⁺₄ activity, and net nitrification in an acid

soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(11): 2215-2221.

- [5] Kweon G, Lund E, Maxton C. Soil organic matter and cation-exchange capacity sensing with on-the-go electrical conductivity and optical sensors[J]. Geoderma, 2013, 199: 80–89.
- [6] Liu J F, Wang Z L, Hu F N, et al. Soil organic matter and silt contents determine soil particle surface electrochemical properties across a long-term natural restoration grassland[J]. CATENA, 2020, 190: 104526.
- [7] Dobbss L B, Canellas L P, Alleoni L R F, et al. Eletrochemistry of Brazilian Oxisols after removal of soluble organic matter[J]. Revista Brasileira De Ciência Do Solo, 2008, 32(3): 985–996.

- [8] 丁昌璞. 中国土壤电化学的发展历程[J]. 土壤, 2013, 45(5): 780-784.
- [9] Yang C, Huang C, Su J. A bibliometrics-based research framework for exploring policy evolution: A case study of China's information technology policies[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 157: 120116.
- [10] Zhong S H, Chen R, Song F, et al. Knowledge mapping of carbon footprint research in a LCA perspective: A visual analysis using CiteSpace[J]. Processes, 2019, 7(11): 818.
- [11] Maia S C, Benedicto G C, Prado J W, et al. Mapping the literature on credit unions: A bibliometric investigation grounded in *Scopus* and Web of Science[J]. Scientometrics, 2019, 120(3): 929–960.
- [12] Liao H C, Tang M, Luo L, et al. A bibliometric analysis and visualization of medical big data research[J]. Sustainability, 2018, 10(1): 166.
- [13] Chen C M, Ibekwe-Sanjuan F, Hou J H. The structure and dynamics of cocitation clusters: A multiple-perspective cocitation analysis[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2010, 61(7): 1386–1409.
- [14] 白如江,刘博文,冷伏海. 基于多维指标的未来新兴科学 研究前沿识别研究[J]. 情报学报, 2020, 39(7): 747-760.
- [15] 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.
- [16] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 3488–3497.
- [17] Bujdák J. Effect of the layer charge of clay minerals on optical properties of organic dyes: A review[J]. Applied Clay Science, 2006, 34(1/2/3/4): 58–73.
- [18] Gupta V, Hampton M A, Stokes J R, et al. Particle interactions in kaolinite suspensions and corresponding aggregate structures[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, 359(1): 95–103.
- [19] Li S Z, Xu R K. Electrical double layers' interaction between oppositely charged particles as related to surface charge density and ionic strength[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, 326(3): 157–161.

- [20] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review[J]. Chemosphere, 2014, 99: 19–33.
- [21] Chen B L, Zhou D D, Zhu L Z. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(14): 5137–5143.
- [22] Cao X D, Ma L N, Gao B, et al. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(9): 3285–3291.
- [23] Marry V, Rotenberg B, Turq P. Structure and dynamics of water at a clay surface from molecular dynamics simulation[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2008, 10(32): 4802–4813.
- [24] Marry V, Dubois E, Malikova N, et al. Water dynamics in hectorite clays: Infuence of temperature studied by coupling neutron spin echo and molecular dynamics[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(7): 2850–2855.
- [25] Ferrage E, Lanson B, Michot L J, et al. Hydration properties and interlayer organization of water and ions in synthetic Na-smectite with tetrahedral layer charge. part 1. results from X-ray diffraction profile modeling[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114(10): 4515–4526.
- [26] Ngouana W B F, Kalinichev A G. Structural arrangements of isomorphic substitutions in smectites: Molecular simulation of the swelling properties, interlayer structure, and dynamics of hydrated Cs-montmorillonite revisited with new clay models[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2014, 118(24): 12758–12773.
- [27] Komadel P, Madejová J, Bujdák J. Preparation and properties of reduced-charge smectites—A review[J]. Clays and Clay Minerals, 2005, 53(4): 313–334.
- [28] López Arbeloa F, Martínez Martínez V. Orientation of adsorbed dyes in the interlayer space of clays. 2 fluorescence polarization of rhodamine 6G in laponite films[J]. Chemistry of Materials, 2006, 18(6): 1407–1416.
- [29] Greathouse J A, Hart D B, Bowers G M, et al. Molecular simulation of structure and diffusion at smectite-water interfaces: Using expanded clay interlayers as model nanopores[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2015, 119(30): 17126–17136.