

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响

唐颖, 李航*, 朱华玲, 田锐, 高晓丹

(西南大学资源环境学院, 土壤多尺度界面过程与调控重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 土壤中普遍存在的有机污染物和无机离子与土壤胶体颗粒的相互作用深刻地影响着土壤中一系列物理、化学和生物学过程. 选取红壤胶体作为对象, 利用动态光散射技术研究了不同浓度十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和 Na⁺ 作用下红壤胶体颗粒的凝聚过程, 并结合体系的 pH 和 Zeta 电位分析了 SDBS/Na⁺ 与土壤胶体颗粒相互作用的机制. 结果表明: ①相同浓度 Na⁺ 作用下, 随着 SDBS 浓度的升高, 土壤胶体悬液稳定性增强. 例如 120 mmol·L⁻¹ Na⁺ 作用下, 随着 SDBS 浓度从 0 mmol·L⁻¹ 升高到 10 mmol·L⁻¹, 凝聚体有效粒径从 702 nm 下降至 193 nm, 总体平均凝聚速率从 28.6 nm·min⁻¹ 减小到 3.36 nm·min⁻¹; ②相同浓度 SDBS 作用下, 随着 Na⁺ 浓度的升高, 体系 Zeta 电位绝对值显著降低, 凝聚体有效粒径逐渐增大, 凝聚速率逐渐加快; ③仅 SDBS 作用下, 随着 SDBS 浓度的升高, 体系 Zeta 电位绝对值从 47.6 mV 增加到 62.2 mV, 体系 pH 从 6.17 升高到 6.76, 但均小于土壤胶体悬液本身的 pH(6.89). 因此, SDBS 通过疏水作用和静电作用吸附于土壤胶体颗粒表面, 增加了颗粒表面的负电荷数量, 降低了作用于胶体颗粒表面的有效 Na⁺ 浓度(SDBS 疏水长链的空间阻碍和高浓度 SDBS 所形成的胶束结构对 Na⁺ 的吸附), 使得胶体悬液稳定性增强, 需要添加更多的 Na⁺ 才能发生凝聚.

关键词: 有机污染物; 无机离子; 静电作用; 疏水作用; 胶体稳定性

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1540-08 DOI: 10.13227/j.hjck.2014.04.049

Impact of SDBS/Na⁺ on Red Soil Colloidal Stability

TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, TIAN Rui, GAO Xiao-dan

(Chongqing Key Laboratory of Soil Multi-Scale Interfacial Process, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The interactions between soil colloidal-sized particles and organic contaminants or inorganic ions profoundly affect numerous soil physical, chemical and biological processes. The coupling effect of sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) and Na⁺ on the aggregation process of red soil colloid was studied using the dynamic light scattering method, and the mechanism of interactions between soil colloidal-sized particles and SDBS/Na⁺ was analyzed according to the pH and Zeta potential of suspension during the aggregation process. Results show that, ①under a given concentration of Na⁺, the soil colloidal suspension becomes more stable with increasing SDBS concentrations. For example, under 120 mmol·L⁻¹ Na⁺, as the concentrations of SDBS increase from 0 mmol·L⁻¹ to 10 mmol·L⁻¹, the effective diameters of aggregates decrease from 702 nm to 193 nm, and the total average aggregation rates of aggregates decrease from 28.6 nm·min⁻¹ to 3.36 nm·min⁻¹. ②Under a given concentration of SDBS, as the concentrations of Na⁺ increase, the Zeta potential of suspension sharply decreases, while the effective diameters and the total average aggregation rates of aggregates gradually increase. ③The absolute values of Zeta potential for suspensions without adding NaNO₃ solution increase from 47.6 mV to 62.2 mV as the SDBS concentrations increase, and the pH of the suspensions increase from 6.17 to 6.76, although these pH values are lower than that of initial soil colloidal suspension (6.89). Therefore, the adsorption of SDBS onto soil colloidal-sized particles, which is attributed to the hydrophobic effect and electrostatic effect, results in the increment of surface charge number, as well as the decrease in effective concentration of Na⁺ around colloidal-sized particles' surface (resulting from the steric hindrance of long hydrophobic chain of adsorbed SDBS and adsorption of Na⁺ by SDBS micelle). As a result, soil colloidal suspension becomes more stable and needs to absorb more Na⁺ to aggregate.

Key words: organic contaminant; inorganic ion; electrostatic interaction; hydrophobic effect; colloidal stability

土壤中共存有大量有机污染物和无机离子, 它们与土壤胶体颗粒的相互作用强烈影响着土壤胶体颗粒的凝聚和分散过程, 进而影响胶体颗粒的迁移运动. 胶体颗粒的随水迁移控制了土壤中多种物质的迁移转化^[1-3], 进而可能引发水土流失、农业面源污染等环境问题. 因此, 深入了解土壤中有机污染物和无机离子对胶体悬液稳定性的影响机制, 对于开展土壤环境保护具有重要意义.

随着社会不断发展, 表面活性剂因具有显著降低界面张力的特性而被广泛应用于洗涤剂 and 农药添加剂等领域^[4-6]. 这类日益增多的有机污染物可以经过多种途径进入土壤环境^[7,8], 并通过与土壤颗粒发生

收稿日期: 2013-08-23; 修订日期: 2013-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671090); 重庆市科委自然科学基金计划项目(CQ CSTC 2011BA7001)

作者简介: 唐颖(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤化学, E-mail: ty881012@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lihangswu@163.com

一系列表面反应从而影响土壤的物理、化学和生物学性质(土壤持水性^[9,10]、颗粒稳定性^[11~13]、微生物分布^[14]、有机污染物和重金属的迁移^[15,16])。然而,由于表面活性剂的多样性和土壤表面结构的复杂性,表面活性剂在土壤粒子上的吸附机制十分复杂。主要通过以下5种方式进行^[4,17~20]:①静电吸附——表面活性剂离子吸附于带有相反电荷的、未被反离子所占据的位点上;②疏水作用——表面活性剂通过疏水基吸附于土壤表面;③离子交换吸附——吸附于土壤表面的反离子被同电性的表面活性剂离子所取代;④氢键形成——表面活性剂与土壤表面极性基团形成氢键而吸附;⑤色散力吸附——此吸附在任何场合均存在。

作为重要的阴离子表面活性剂,十二烷基苯磺酸钠(SDBS)近年来也备受关注。SDBS在水中可电离出Na⁺和十二烷基苯磺酸根离子(DBS⁻),其中十二烷基为疏水基,苯磺酸根离子为亲水基。目前大量研究主要围绕SDBS与其他有机污染物和重金属离子共存下的吸附行为展开^[15,21~27],对SDBS和无机离子共存下的吸附行为及其对土壤胶体悬液稳定性的影响研究较少。由于土壤胶体颗粒具有巨大的比表面积,可以吸附大量的SDBS和无机离子,改变胶

体颗粒的表面性质,影响颗粒间的相互作用,从而影响土壤胶体悬液的稳定性。鉴于此,本研究以红壤胶体为对象,运用动态光散射方法,分析了不同浓度SDBS/Na⁺对红壤胶体悬液稳定性的影响,通过揭示土壤胶体颗粒与SDBS/Na⁺相互作用的机制,以期为了了解表面活性剂污染严重环境中的水土流失情况提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与样品制备

以采自江西鹰潭0~20 cm土层的红壤[pH(H₂O)=5.0]作为供试土壤。土壤经风干后,剔除石块、草屑等异物,研磨并全部通过60目(0.25 mm)筛。土壤有机质13.5 g·kg⁻¹,全氮0.706 g·kg⁻¹,全磷0.284 g·kg⁻¹。采用Li等^[28]提出的表面参数联合测定法测定土壤表面性质(如表1)。红壤颗粒的X射线衍射图谱(图1)表明土壤的主要矿物类型为石英(*d*为0.334 nm和0.426 nm)、钾长石(*d*为0.325 nm)、高岭石(*d*为0.718 nm)和赤铁矿(*d*为0.269 nm)。SDBS[CH₃(CH₂)₁₁C₆H₄SO₃Na]的摩尔质量为348.5 g·mol⁻¹,纯度为99%,购于成都市科农化工试剂厂。

表1 Na、Ca混合电解质体系中测定的红壤颗粒表面性质

Table 1 Surface properties of the original red soil and soil colloids in Na and Ca mixed electrolytes system

材料	表面电位 /V	比表面积 ×10 ³ /dm ² ·g ⁻¹	电荷密度 ×10 ⁻³ /C·dm ⁻²	电荷数量 /cmol(-)·kg ⁻¹	表面电场强度 ×10 ⁸ /V·m ⁻¹
原土	-0.094 1	8.36	1.11	9.39	1.54
胶体颗粒	-0.038 1	128	0.111	19.0	0.458

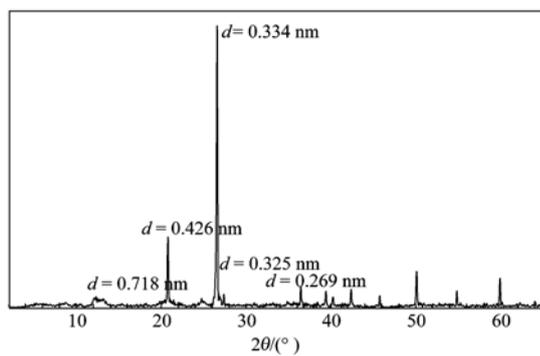


图1 红壤颗粒的X射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of red soil particles

土壤胶体颗粒的制备:在土壤样品中加入H₂O₂去除有机质^[29],随后称取去除有机质的烘干土样50 g于500 mL超纯水中,用0.5 mol·L⁻¹的KOH溶液调节悬液pH至7.5。用探针型超声波处理器将悬

液在20 kHz下超声分散15 min后转入5 000 mL烧杯,并用超纯水定容至刻度。土壤悬液用多孔圆盘搅拌均匀后,在25℃恒温条件下静置。采用静水沉降法^[30]提取并收集<200 nm的胶体悬液,将其定容于1 L容量瓶中。用烘干法测得悬液的原始颗粒密度为0.25 g·L⁻¹,土壤胶体颗粒的表面性质参数见表1。取一定量悬液于500 mL烧杯中,用KOH溶液调节pH为7.2,用探针型超声波处理器在20 kHz下振荡分散15 min,放置24 h备用。火焰光度法测得悬液中K⁺的浓度小于10⁻⁵ mol·L⁻¹,因此在实验中可以被忽略。

1.2 动态光散射测定

本实验选用仪器为美国Brookhaven公司生产的BI-200SM广角度激光光散射仪,数字相关器为BI-9000AT,设定激光器电压为15 mV。恒温循环器控制温度为25℃,入射光波长为532 nm,狭缝设置

为 $100\ \mu\text{m}$, 散射角度为 90° 。

根据前期预备实验, 确定红壤胶体上机测定的最佳颗粒密度为 $0.0375\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 此时胶体悬液的 pH 为 6.89. 先配备浓度为 $1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaNO_3 溶液和 $100\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SDBS 溶液, NaNO_3 溶液的实验浓度为 10、30、50、60、80、100、120、150、200、250、275 和 $300\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, SDBS 溶液的实验浓度为 0、0.1、1.0 和 $10\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 从 500 mL 烧杯中取出 1.5 mL 土壤胶体悬液加入散射瓶中, 再依次加入超纯水、适宜浓度的 SDBS 溶液, 轻摇并放置 1 h 后, 加入适宜浓度的 NaNO_3 溶液, 保证上机测定时体系总体积 (10 mL) 和胶体颗粒密度 ($0.0375\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 恒定. 快速轻摇散射瓶后将其放入样品池中. 激光散射仪每隔 30 s 记录一次散射光强、粒径等数据, 连续测定 1 h, 以跟踪凝聚过程中红壤胶体颗粒散射光强和有效粒径随时间的动态变化.

1.3 体系 Zeta 电位测定

动态光散射实验完成后, 各样品最终的 Zeta 电位采用美国 Brookhaven 公司生产的 Zetaplus 仪器进行测定.

2 结果与讨论

2.1 SDBS/ Na^+ 作用下土壤胶体凝聚体有效粒径随时间的变化

在土壤胶体凝聚过程中, 凝聚体受到的布朗力和重力的相对强度发生变化, 散射光强也随之改变^[31]. 本研究分析了光强稳定的 0~30 min 范围内布朗运动支配下的凝聚体有效粒径随时间的动态变化 (图 2). 土壤胶体凝聚是一个“接近-接触-粘结”的过程. 颗粒能否接近、接触, 取决于颗粒的相互碰撞, 能否粘结, 则取决于碰撞效率. 目前, 根据胶体颗粒碰撞后的有效碰撞概率在 0~1 之间, 人们提出了胶体颗粒凝聚的两种分形凝聚机制: 扩散控制簇团凝聚 (DLCA, 又称快速凝聚) 机制和反应控制簇团凝聚 (RLCA, 又称慢速凝聚) 机制. 其中, 当电解质浓度较低时, 双电层的静电排斥力迅速增加, 颗粒间有效碰撞概率小于 1, 胶体表现出 RLCA 机制, 此时凝聚体的有效粒径随时间呈线性或者对数函数增长规律; 当电解质浓度很高时, 胶体表现出 DLCA 机制, 此时有效碰撞概率等于 1, 凝聚体粒径随时间

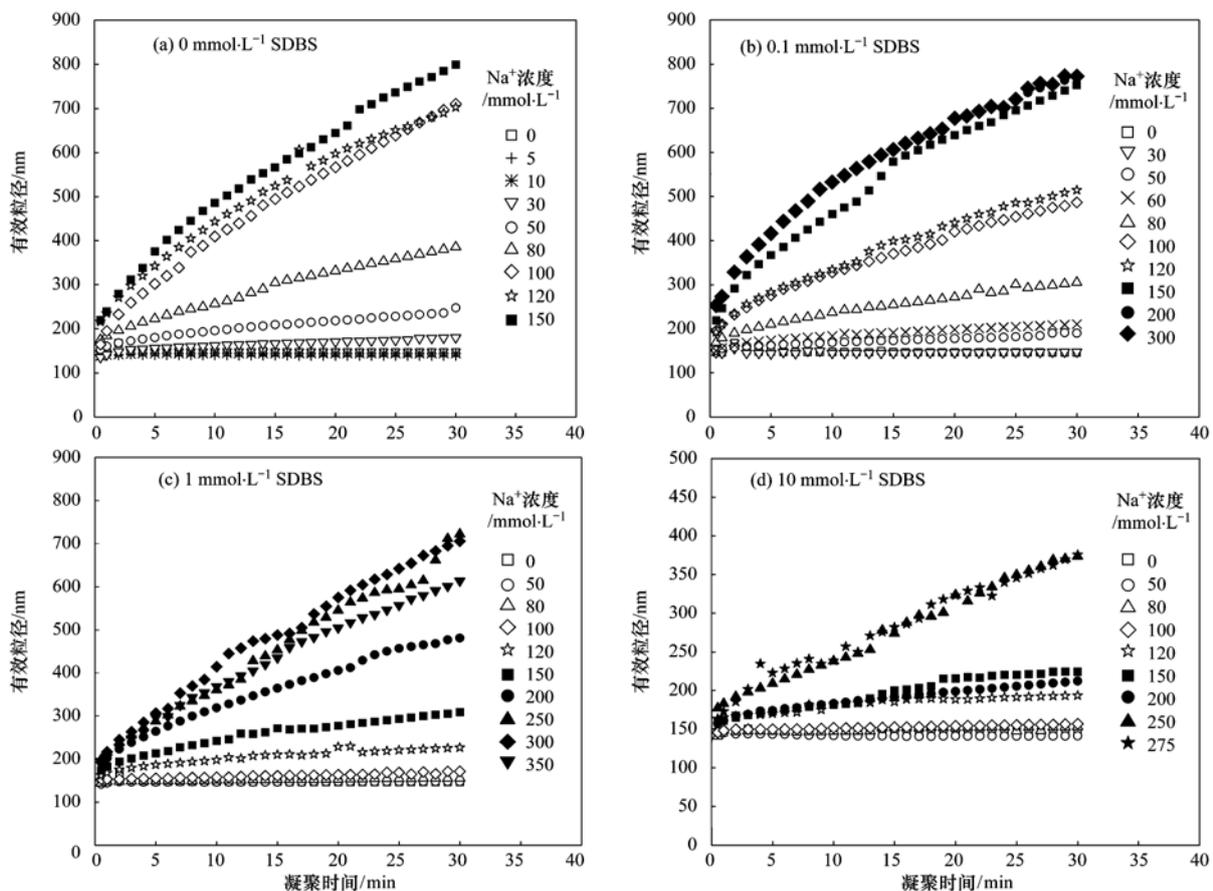


图 2 不同 SDBS/ Na^+ 浓度下红壤胶体凝聚体有效粒径随时间的变化

Fig. 2 Variation of effective diameter of the aggregates of red soil colloids vs. time with different concentrations of SDBS and Na^+

幂函数增加^[31,32]. 由图 2 可知:①不同浓度 SDBS/Na⁺ 作用下土壤胶体颗粒发生不同程度的凝聚. 其中,0、0.1 和 1 mmol·L⁻¹ SDBS 作用下,低 Na⁺ 浓度时凝聚体有效粒径随时间呈线性增长,凝聚机制为 RLCA 机制;高 Na⁺ 浓度时凝聚体有效粒径随时间呈幂函数增长,凝聚机制为 DLCA 机制. 然而,10 mmol·L⁻¹ SDBS 作用下土壤胶体凝聚未表现出 DLCA 机制,且随着 Na⁺ 浓度进一步升高,胶体悬液中出现白色絮状沉淀物;②同一 Na⁺ 浓度下,随着 SDBS 浓度的增加,凝聚体有效粒径显著减小. 例如,加入 120 mmol·L⁻¹ NaNO₃ 时,0、0.1、1 和 10 mmol·L⁻¹ SDBS 作用下形成的凝聚体最终的有效粒径分别为 702、512、227 和 193 nm.

2.2 SDBS/Na⁺ 作用下土壤胶体凝聚速率的变化

根据土壤胶体凝聚体有效粒径随时间的变化关系(图 2),利用公式(1)计算出土壤胶体凝聚过程中不同凝聚时间的凝聚速率,得到凝聚速率与时间的拟合方程,进而利用公式(2)^[33]计算出不同浓度 SDBS/Na⁺ 作用下胶体凝聚的总体平均凝聚速率(TAA rates)(图 3):

$$v(f_0, t) = \frac{dD(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\bar{v}_T(f_0) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v(f_0, t) dt \quad (2)$$

式中, $v(f_0, t)$ 为凝聚速率(nm·min⁻¹); f_0 为扩散双层中的离子浓度(mmol·L⁻¹); t 为时间(min); $D(t)$ 为特定时间下胶体颗粒的粒径(nm); $\bar{v}_T(f_0)$ 为总体平均凝聚速率(nm·min⁻¹).

由图 3 可知:①不同 SDBS 浓度下,胶体颗粒的总体平均凝聚速率随着 Na⁺ 浓度的升高呈现出不同的变化趋势. 其中,SDBS 浓度 ≤ 1 mmol·L⁻¹ 时,总体平均凝聚速率随 Na⁺ 浓度的升高先直线上升(RLCA 阶段),而后进入一个平台(DLCA 阶段). SDBS 浓度为 10 mmol·L⁻¹ 时,土壤胶体凝聚仅处于 RLCA 阶段. ②同一 Na⁺ 浓度下,随着 SDBS 浓度的增加,土壤胶体的总体平均凝聚速率显著下降. 例如,Na⁺ 浓度为 120 mmol·L⁻¹ 时,0、0.1、1 和 10 mmol·L⁻¹ SDBS 作用下的总体平均凝聚速率分别为 28.6、19.1、4.73 和 3.36 nm·min⁻¹.

用直线关系拟合不同凝聚阶段总体平均凝聚速

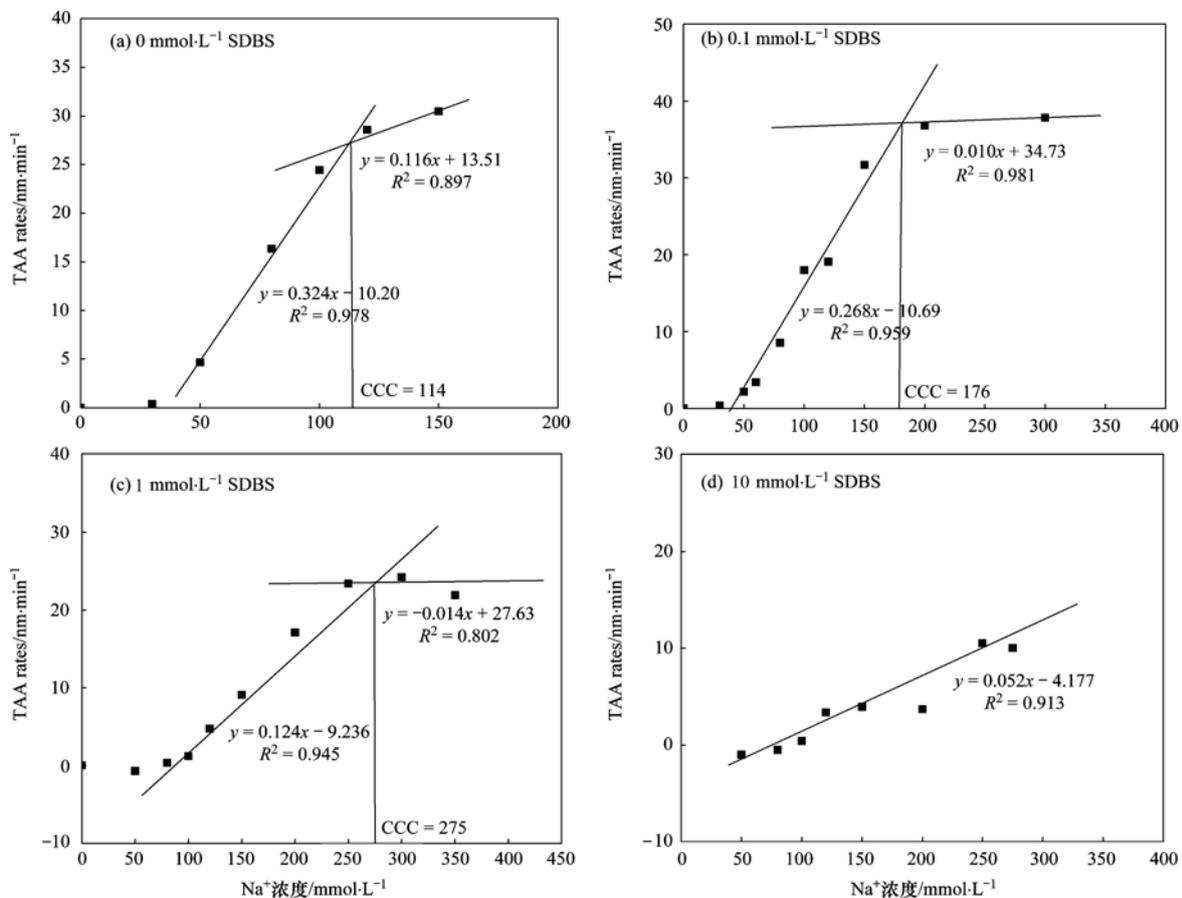


图 3 不同浓度 SDBS 作用下,红壤胶体总体平均凝聚速率随 Na⁺ 浓度的变化

Fig. 3 Variation of TAA rates of red soil colloids vs. Na⁺ concentrations with different concentrations of SDBS

率与 Na^+ 浓度的关系,可以得到不同浓度 SDBS 作用下胶体凝聚所需的 Na^+ 浓度,即临界絮凝浓度 (CCC)^[33].从图 3 可以看出,随着 SDBS 浓度的增加,CCC 值显著增大.其中 $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SDBS 作用下的 CCC 值 ($176 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 大于 $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SDBS 作用下的 CCC 值 ($114 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$),约为 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SDBS 作用下的 CCC 值 ($275 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的一半,而 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SDBS 作用下的 CCC 值更是大于 $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.这些都说明随着 SDBS 添加量增加, Na^+ 越不容易引起土壤胶体颗粒凝聚.

2.3 SDBS/ Na^+ 作用下土壤胶体悬液的 Zeta 电位变化

图 4 为不同浓度 SDBS/ Na^+ 作用下,土壤胶体发生凝聚反应后体系的 Zeta 电位.结果表明:①同一 SDBS 浓度下,随着 Na^+ 浓度的升高,土壤胶体颗粒的扩散双电层逐渐被压缩,Zeta 电位的绝对值显著减小,颗粒间的静电排斥力减小,土壤胶体颗粒逐渐凝聚.②在相同的 Na^+ 浓度下,SDBS 浓度越高,Zeta 电位绝对值也越大,颗粒间的静电排斥力增大,土壤胶体颗粒越稳定.这说明在土壤胶体悬液中加入 SDBS 会引起胶体颗粒表面性质的改变,进而深刻影响土壤胶体颗粒对 Na^+ 的吸附.因此,研究胶体颗粒与 SDBS 相互作用的机制十分重要.

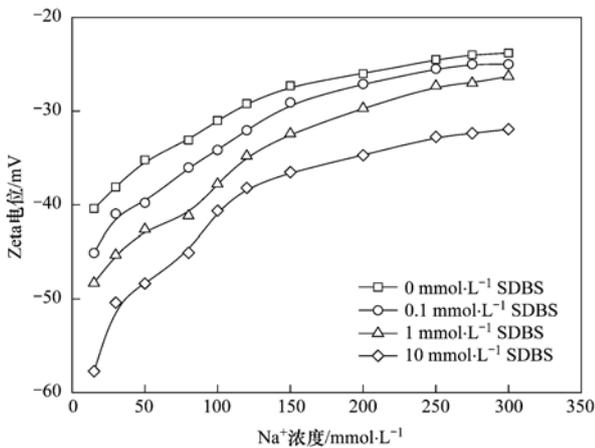


图 4 不同浓度 SDBS/ Na^+ 作用下体系 Zeta 电位的变化
Fig. 4 Variation of Zeta potential of red soil colloids with different concentrations of SDBS and Na^+

由图 5 和图 6 可以直观地看出,随着土壤胶体悬液中加入的 SDBS 浓度从 $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,胶体颗粒表面的电荷数量急剧增加,体系 Zeta 电位绝对值从 43.6 mV 上升到 62.2 mV ,胶体颗粒分散性增强,凝聚时间为 30 min 时的凝聚体有效粒径从 146.2 nm 减少至 135.8 nm .

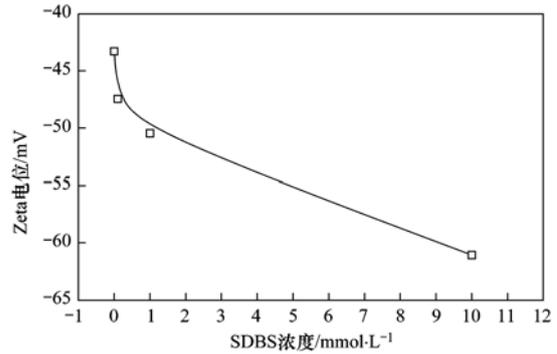


图 5 不同浓度 SDBS 作用下体系 Zeta 电位的变化
Fig. 5 Variation of Zeta potential of red soil colloids with different concentrations of SDBS

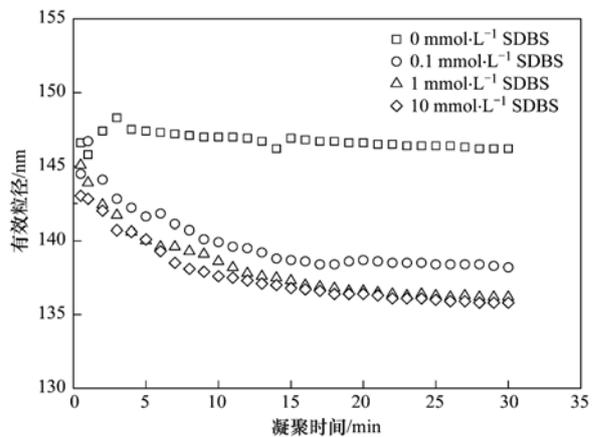
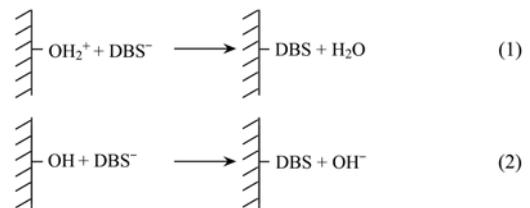


图 6 不同浓度 SDBS 作用下土壤胶体凝聚体有效粒径随时间的变化

Fig. 6 Variation of effective diameter of the aggregates of red soil colloids vs. time with different concentrations of SDBS

2.4 土壤胶体颗粒与 SDBS/ Na^+ 相互作用的机制

通常认为配位体交换^[34,35]、静电吸附^[4,36]、氢键形成^[4,36]、疏水作用^[29,37,38]和离子交换^[20,39]是表面活性剂在土壤颗粒表面吸附的主要方式.当红壤胶体悬液 pH 为 6.89 时,胶体颗粒表面带有大量的负电荷(表 1), DBS^- 发生离子交换吸附的几率很小.氢键形成吸附主要发生在土壤粒子吸附非离子表面活性剂过程中^[18].Inoue 等^[35]提出含有大量三氧化二物的胶体颗粒会与 DBS^- 发生如下的配位体交换反应:



显然,随着吸附于土壤胶体颗粒表面的 DBS^- 的浓

度增加,体系的 pH 显著升高.而在本实验中,如表 2 所示,尽管随着 DBS⁻ 的浓度从 0.1 mmol·L⁻¹ 增加到 10 mmol·L⁻¹,体系的 pH 从 6.17 逐渐增大到 6.76,但是其 pH 数值均小于土壤胶体本身的 pH (6.89).再者,红壤颗粒所含的赤铁矿(*d* 为 0.269 nm)较少(图 1),因此配位体交换吸附不是 DBS⁻ 吸附于红壤胶体颗粒表面的主要方式.加入 SDBS 溶液后体系 pH 小于胶体悬液本身的 pH 的原因可能是添加的 SDBS 溶液本身带有弱酸性,且浓度越低酸性越强(表 2).

表 2 SDBS 吸附于土壤胶体颗粒表面引起的 pH(H₂O) 变化

Table 2 Variation of pH(H₂O) during the adsorption of SDBS on red soil colloids

SDBS 浓度/mmole·L ⁻¹	未加土壤胶体	加入土壤胶体
0	—	6.89
0.1	5.78	6.17
1	5.97	6.55
10	6.24	6.76

红壤颗粒含有大量 1:1 型非膨胀型黏土矿物高岭石(图 1),因此带有很多疏水基团. DBS⁻ 可能通过疏水作用吸附于胶粒表面.如图 7(a) 所示,低浓度 SDBS 作用下(例如 <0.1 mmol·L⁻¹),由于胶体颗粒表面负电荷的排斥作用,仅有少部分 DBS⁻ 单体的疏水基团长链部分吸附于土壤胶体颗粒表面,使得胶粒表面电荷数量和 Zeta 电位略有增加.此时,在胶体悬液中加入 NaNO₃ 溶液,与不加 SDBS 体

系相比,胶体颗粒间排斥位能增大,颗粒凝聚速率变慢.当 SDBS 浓度增加到 1 mmol·L⁻¹,如图 7(b) 所示,一方面,SDBS 电离出的 Na⁺ 压缩胶体颗粒双电层,使带负电荷的胶体表面对 DBS⁻ 单体的静电排斥力相对减小,较多的 DBS⁻ 通过疏水端吸附于胶体颗粒表面.与不加 SDBS 体系相比,加入相同浓度的 NaNO₃ 溶液,颗粒表面电荷数量的增加和长链 DBS⁻ 的空间阻碍作用导致外加 Na⁺ 不易压缩胶体颗粒双电层,引发土壤胶体凝聚.另一方面,由于 SDBS 的临界胶束浓度为 1 mmol·L⁻¹ 左右^[34,40,41],此浓度下 DBS⁻ 单体开始通过疏水作用形成胶束,大量带负电亲水端暴露于胶体悬液中,也会吸附部分 Na⁺,使得直接作用于胶体颗粒表面的有效 Na⁺ 浓度降低,胶体凝聚速率减慢,体系的 CCC 值显著增大.进一步地,随着 SDBS 浓度增加到 10 mmol·L⁻¹,如图 7(c) 所示,胶体悬液中的 DBS⁻ 胶束越来越多,Zeta 电位绝对值继续升高,与不加 SDBS 体系相比,加入相同浓度 NaNO₃ 溶液后胶体颗粒凝聚速率更慢.然而,当外加 Na⁺ 浓度 >300 mmol·L⁻¹,胶体悬液中出现大量白色絮状沉淀物. Young 等^[42] 的研究发现,当表面活性剂十二烷基硫酸钠在溶液中以胶束形式存在时,大量 NaCl 的加入会压缩胶束双电层,产生絮状沉淀物.本实验中出现的白色絮状沉淀物也可能是大量 Na⁺ 作用于 DBS⁻ 胶束表面,压缩胶束双电层,使其脱稳凝聚而形成的.

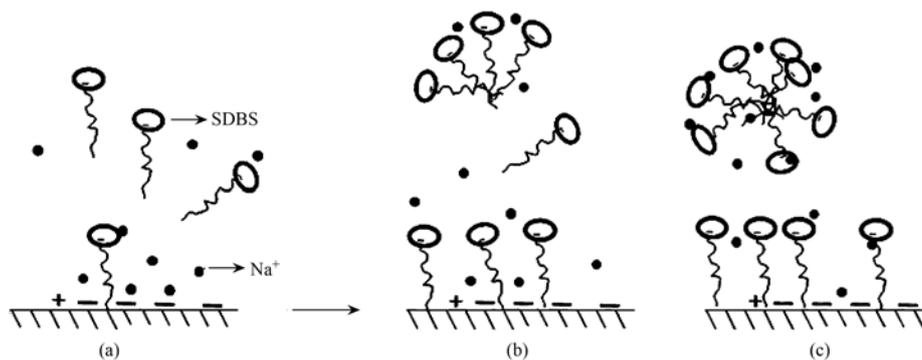


图 7 SDBS 通过疏水作用吸附于土壤胶体颗粒表面的示意

Fig. 7 Schematic diagram of hydrophobic adsorption of SDBS on red soil colloids surface

另外,红壤颗粒所含的高岭石晶体边面携带有少量正电荷,带负电的 DBS⁻ 单体亲水端可以通过静电作用吸附于土壤胶体颗粒表面.当 SDBS 浓度较低时,如图 8(a) 所示,少量 DBS⁻ 单体利用带负电的亲水端单层吸附于土壤胶体颗粒表面,中和表面部分正电荷.此时在悬液中加入 NaNO₃ 溶液,外加的 Na⁺ 可吸附于胶体颗粒表面.然而,DBS⁻ 单体的

疏水端暴露于悬液中,吸附于不同胶体颗粒上的 DBS⁻ 可通过疏水作用相互交叉重叠而形成粒间表面胶束,从而降低胶体悬液的稳定性.很多实验也在此基础上得出了低浓度的 SDBS 削弱土壤胶体悬液稳定性的结论^[39,43].但在本实验中,由于红壤胶体颗粒表面带有大量负电荷(表 1),通过静电作用吸附的 DBS⁻ 较少,低浓度 SDBS 削弱土壤胶体悬液稳

定性的效果被屏蔽. 随着 SDBS 添加量的增加, 当 SDBS 电离出的 Na^+ 使得胶体颗粒的扩散双电层压缩到一定程度时, 大量 DBS^- 单体带负电的亲水端吸附于土壤胶体颗粒表面, 且随着体系 SDBS 浓度的进一步升高 (例如 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), 如图 8(b) 所示, 胶体悬液中的 DBS^- 单体还将通过疏水基与被吸附于胶体颗粒表面的 DBS^- 的疏水基相互作用, 从而形成双层吸附的表面胶束结构^[39]. 此时土壤胶体颗粒表面负电荷数量的急剧增加和双层长链 DBS^- 的空间阻碍作用导致外加 Na^+ 难以吸附于胶体颗粒表面. 同时, 悬液中的大量 DBS^- 胶束也将吸附大量的 Na^+ , 使得作用于土壤胶体颗粒表面的有效 Na^+ 浓度大大减小. 与不加 SDBS 体系相比, 加入相同浓度的 NaNO_3 溶液, 土壤胶体颗粒不易发生凝聚.

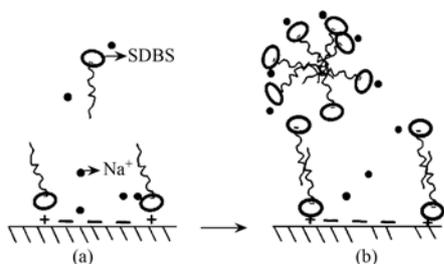


图 8 SDBS 通过静电作用吸附于土壤胶体颗粒表面示意

Fig. 8 Schematic diagram of electrostatic adsorption of SDBS on red soil colloids surface

综上所述, SDBS 主要通过疏水作用和静电作用吸附于红壤胶体颗粒表面, 改变胶体颗粒表面的电荷数量和结构从而提高胶体悬液的稳定性. Na^+ 通过压缩土壤胶体颗粒的扩散双电层, 降低颗粒间的静电排斥力使土壤胶体发生凝聚. 二者的耦合作用表明当 SDBS 吸附量较多时, 土壤胶体颗粒由于强静电排斥作用和 SDBS 疏水长链的空间阻碍作用而越分散, 容易携带大量的无机离子随水迁移, 并由此引发一系列的环境问题, 如水土流失、面源污染、重金属污染等. 因此, 如何高效利用这种阴离子表面活性剂, 控制其在土壤中的含量是一个急需解决的问题.

3 结论

(1) SDBS 和 Na^+ 的浓度显著影响红壤胶体悬液的稳定性. 当 Na^+ 浓度相同时, 增加 SDBS 的浓度会增强胶体悬液的稳定性. 例如 $120 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{Na}^+$ 作用下, 随着 SDBS 浓度从 $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 土壤胶体凝聚体有效粒径从 702 nm 下降至 193 nm , 总体平均凝聚速率从 $28.6 \text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$

减小到 $3.36 \text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$. 然而, 当 SDBS 浓度相同时, 增加 Na^+ 浓度会压缩胶体颗粒表面双电层厚度, 从而降低胶体悬液的稳定性.

(2) SDBS 通过疏水作用和静电作用吸附于土壤胶体颗粒表面, 增加胶体颗粒表面的电荷数量, 同时降低作用于胶体表面的有效 Na^+ 浓度 (SDBS 疏水长链的空间阻碍和高浓度 SDBS 形成的胶束结构对 Na^+ 的吸附), 使得胶体颗粒间的静电排斥力增大, 悬液稳定性增强, 需要吸附更多 Na^+ 才能发生凝聚. 这对研究其他无机离子或重金属离子在被 SDBS 污染的环境中的迁移转化具有重要借鉴意义.

参考文献:

- [1] McCarthy J F, Zachara J M. Subsurface transport of contaminants [J]. Environmental Science & Technology, 1989, **23**(5): 496-502.
- [2] Grolmund D, Borkovec M, Barmettler K, et al. Colloid-facilitated transport of strongly sorbing contaminants in natural porous media: a laboratory column study [J]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(10): 3118-3123.
- [3] Ryan J N, Elimelech M. Colloid mobilization and transport in groundwater [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1996, **107**: 1-56.
- [4] Ou Z Q, Yediler A, He Y W, et al. Adsorption of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) on soils [J]. Chemosphere, 1996, **32**(5): 827-839.
- [5] Jia L Q, Ou Z Q, Ouyang Z Y. Ecological behavior of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) in soil-plant systems [J]. Pedosphere, 2005, **15**(2): 216-224.
- [6] Jensen J, Smith S R, Krogh P H, et al. European risk assessment of LAS in agricultural soil revisited: species sensitivity distribution and risk estimates [J]. Chemosphere, 2007, **69**(6): 880-892.
- [7] Elsgaard L, Petersen S O, Deboz K. Effects and risk assessment of linear alkylbenzene sulfonates in agricultural soil. 1. Short-term effects on soil microbiology [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001, **20**(8): 1656-1663.
- [8] Scott M J, Jones M N. The biodegradation of surfactants in the environment [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes, 2000, **1508**(1): 235-251.
- [9] Karagunduz A, Pennell K D, Young M H. Influence of a nonionic surfactant on the water retention properties of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, **65**(5): 1392-1399.
- [10] Wang W, Kwak J C T. Adsorption at the alumina-water interface from mixed surfactant solutions [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1999, **156**(1): 95-110.
- [11] Wang X J, Li X F, Yang S. Influence of pH and SDBS on the stability and thermal conductivity of nanofluids [J]. Energy & Fuels, 2009, **23**(5): 2684-2689.

- [12] Sjöberg M, Bergström L, Larsson A, *et al.* The effect of polymer and surfactant adsorption on the colloidal stability and rheology of kaolin dispersions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, **159**(1): 197-208.
- [13] Piccolo A, Mbagwu J S C. Effects of humic substances and surfactants on the stability of soil aggregates[J]. *Soil Science*, 1989, **147**(1): 47-54.
- [14] Wang N, Besser J M, Buckler D R, *et al.* Influence of sediment on the fate and toxicity of a polyethoxylated tallowamine surfactant system (MON 0818) in aquatic microcosms[J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(4): 545-551.
- [15] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review [J]. *Engineering Geology*, 2001, **60**(1): 371-380.
- [16] 赵保卫, 吴咏琪, 马婵媛, 等. 表面活性剂对污染土壤中重金属 Cu(II) 的洗脱试验研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 3067-3071.
- [17] Zhang R, Somasundaran P. Advances in adsorption of surfactants and their mixtures at solid/solution interfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, **123-126**: 213-229.
- [18] 饶品华, 何明. 表面活性剂在土壤中的行为及其对土壤物理特性的影响(综述)[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2005, **20**(3): 325-331.
- [19] Paria S, Khilar K C. A review on experimental studies of surfactant adsorption at the hydrophilic solid-water interface[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2004, **110**(3): 75-95.
- [20] 赵国玺. 表面活性剂物理化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1991.
- [21] Zhang Y, Liao B H, Zeng Q R, *et al.* Surfactant linear alkylbenzene sulfonate effect on soil Cd fractions and Cd distribution in soybean plants in a pot experiment [J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(2): 242-247.
- [22] Varshney K G, Rafiquee M Z A, Somya A. Effect of surfactants on the adsorption behaviour of tin (IV) phosphate, cation exchanger for alkaline earths and heavy metal ions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, **301**(1): 224-228.
- [23] Zhao B W, Zhu L Z, Li W, *et al.* Solubilization and biodegradation of phenanthrene in mixed anionic-nonionic surfactant solutions[J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(1): 33-40.
- [24] 曹罡, 莫汉宏, 安凤春. 阴离子表面活性剂对 2,4-D 在土壤中吸附的影响[J]. *环境化学*, 2002, **21**(4): 356-359.
- [25] 张景环, 陈春溶, 张玮航, 等. 表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1639-1645.
- [26] 曹晓燕, 景建宁, 杨桂朋, 等. 表面活性剂对 DDT 在胶州湾沉积物上吸附行为的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3327-3334.
- [27] 曹晓燕, 韩辉, 杨桂朋. SDBS 对重油在胶州湾沉积物上吸附行为的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 3011-3017.
- [28] Li H, Hou J, Liu X M, *et al.* Combined determination of specific surface area and surface charge properties of charged particles from a single experiment [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, **75**(6): 2128-2135.
- [29] House W A, Farr I S. Adsorption of sulphonates from detergent mixtures on potassium kaolinite [J]. *Colloids and Surfaces*, 1989, **40**: 167-180.
- [30] 熊毅. 土壤胶体[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 7-31.
- [31] 朱华玲, 李兵, 熊海灵, 等. 不同电解质体系中土壤胶体凝聚动力学的动态光散射研究[J]. *物理化学学报*, 2009, **25**(6): 1225-1231.
- [32] 高晓丹, 李航, 朱华玲, 等. 特定 pH 条件下 Ca²⁺/Cu²⁺ 引发胡敏酸胶体凝聚的比较研究[J]. *土壤学报*, 2012, **49**(4): 698-707.
- [33] Jia M Y, Li H, Zhu H L, *et al.* An approach for the critical coagulation concentration estimation of polydisperse colloidal suspensions of soil and humus [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, **13**(2): 325-335.
- [34] Rao P H, He M, Yang X, *et al.* Effect of an anionic surfactant on hydraulic conductivities of sodium- and calcium-saturated soils [J]. *Pedosphere*, 2006, **16**(5): 673-680.
- [35] Inoue K, Kaneko K, Yoshida M. Adsorption of dodecylbenzenesulfonates by soil colloids and influence of soil colloids on their degradation [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1978, **24**(1): 91-102.
- [36] Litz N, Doering H W, Thiele M, *et al.* The behavior of linear alkylbenzenesulfonate in different soils: a comparison between field and laboratory studies[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1987, **14**(2): 103-116.
- [37] Marchesi J R, House W A, White G F, *et al.* A comparative study of the adsorption of linear alkyl sulphates and alkylbenzene sulfonates on river sediments[J]. *Colloids and Surfaces*, 1991, **53**(1): 63-78.
- [38] Hand V C, Williams G K. Structure-activity relationships for sorption of linear alkylbenzenesulfonates [J]. *Environmental Science & Technology*, 1987, **21**(4): 370-373.
- [39] 饶品华. 表面活性剂在土壤中的吸附行为及其对土壤物理特性的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [40] Özdemir O, Çtinar M, Sabah E, *et al.* Adsorption of anionic surfactants onto sepiolite [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **147**(1-2): 625-632.
- [41] Haigh S D. A review of the interaction of surfactants with organic contaminants in soil [J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **185**(1): 161-170.
- [42] Young S L, Matijević E. Precipitation phenomena of heavy metal soaps in aqueous solutions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1977, **61**(2): 287-301.
- [43] Abdul A S, Gibson T L, Rai D N. Selection of surfactants for the removal of petroleum products from shallow sandy aquifers [J]. *Ground Water*, 1990, **28**(6): 920-926.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride(TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行