

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息(1490,1496,1586,1743)	

蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征

王慎阳, 饶伟, 王代长*, 张亚楠, 李腾, 唐冰培, 杨世杰

(河南农业大学资源与环境学院, 河南省高校农业资源与环境工程技术研究中心, 郑州 450002)

摘要: 采用平衡法研究了蒙脱土、高岭土和针铁矿在不同 pH 值和不同电解质溶液下的 DNA 吸附解吸特征。结果表明, 在 4 种电解质体系中, 尤其在溶液 pH 值 > 5.0 时, 3 种矿物在吸附过 DNA 后, pH 有不同程度上升, 但 CaCl_2 电解质体系中含针铁矿溶液的 pH 开始下降。针铁矿对 DNA 的吸附率大约为 75% ~ 91%, 高岭土对 DNA 的吸附率从 pH 为 3.5 时的 90% 开始下降, 至 pH 6.0 ~ 7.0 时的下降至大约 18% ~ 50%。在一价电解质体系, 当溶液 pH 值为 2.2 ~ 5.0 时蒙脱土对 DNA 的吸附率大约为 90% 开始下降至 25% ~ 40%, 但在二价电解质体系蒙脱土对 DNA 的吸附率大约为 92%。Freundlich 等温吸附方程能更好的拟合针铁矿、蒙脱土和高岭土对 DNA 的吸附。蒙脱土对 DNA 相对吸附容量在 pH 3.5 时大于针铁矿, 而 pH 5.0 时小于针铁矿。以 NaOAc 为解吸剂, 针铁矿、蒙脱土和高岭土上吸附 DNA 在不同 pH 时解吸率分别为 0.1% ~ 0.4%、63.7% ~ 90.2% 和 29.7% ~ 87.5%。以 NaH_2PO_4 为解吸剂时, 这些矿物吸附 DNA 的解吸率分别为 69.6% ~ 78.7%、0.8% ~ 7.0% 和 0.4% ~ 2.2%。这表明针铁矿吸附 DNA 时键合作用较大, 蒙脱土和高岭土静电引力较大, 这是 DNA 在不同电荷类型矿物表面的吸附差异。

关键词: 蒙脱土; 高岭土; 针铁矿; DNA; 吸附与解吸

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1736-08

Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite

WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, ZHANG Ya-nan, LI Teng, TANG Bing-pei, YANG Shi-jie

(Engineering Research Center of Agricultural Resources and Environment, Colleges and Universities of Henan Province, College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The characteristics of adsorption and desorption of DNA by montmorillonite, kaoline and goethite at different pH values and different electrolytes were studied using a batch method. It showed that there was an obvious increase of solution pH value after adsorption of DNA by the three minerals in four electrolyte systems especially in solution pH > 5.0 except as pH of DNA solution by goethite decreased in CaCl_2 electrolyte systems. Percentage of DNA adsorption by goethite was about 75% - 91%, and that by kaoline decreased from 90% in solution pH 3.5 to 18% - 50% when solution pH was 6.0 - 7.0, and that by montmorillonite decreased from 95% in solution pH 2.2 - 5.0 to 25% - 40% in solution pH 7.0 in monovalent electrolyte systems and was about 92% in divalent electrolyte systems. Freundlich equation could be used to describe DNA isotherm adsorption by three minerals. Relative adsorption capacity of DNA by montmorillonite was greater than that by goethite in solution pH 3.5, where less than that by the solution pH 5.0. The differences of desorption on three minerals were significant while the adsorbed DNA was desorbed with NaOAc solution and NaH_2PO_4 solution. The percentages of DNA desorption when NaOAc as the desorbent in goethite, montmorillonite and kaoline were 0.1% - 0.4%, 63.7% - 90.2% and 29.7% - 87.5% at different pH values, while those were 69.6% - 78.7%, 0.8% - 7.0% and 0.4% - 2.2% when NaH_2PO_4 as the desorbent, respectively. These results implied that the ligand exchange played a more important role in DNA adsorption on goethite, and electrostatic interactions did on montmorillonite and kaoline. This was the differences of DNA adsorption and desorption on different charge minerals surfaces.

Key words: montmorillonite; kaoline; goethite; DNA; adsorption and desorption

在土壤环境中, DNA 分子来自微生物、植物和动物残体的分泌物或即将死亡细胞的水解^[1]。细胞外的 DNA 分子被吸附到土壤活性颗粒表面, 具有变形感应细胞的能力, 改变了它们的活性, 阻止核酸酶的降解, 保持细菌细胞的转化能力^[2]。被吸附的 DNA 分子, 称为环境基因, 在土壤生物活性、多样性以及细菌基因转化方面起重要作用^[3], 有助于土壤生物多样性和基因修正微生物体的评价。以往认为核酸酶能迅速降解微生物体释放的 DNA^[4], 但大多

数细菌群体不能在人工基质上培育, 从土壤中提取 DNA 很困难^[5,6], DNA 被土壤颗粒表面的吸附机制研究有助于解决有效的提取 DNA 的方法。

DNA 分子在砂粒^[7]、层状硅酸盐^[8,9]、腐殖质^[10,11]、合成矿物^[12~14]、土壤和土壤胶体^[15~17]等

收稿日期: 2011-07-10; 修订日期: 2011-09-19

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAJ08B13)

作者简介: 王慎阳(1985 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为土壤化学, E-mail: wshy126@126.com

* 通讯联系人, E-mail: dzwang@henau.edu.cn

的吸附已有大量的研究,DNA 被活性颗粒的吸附保护显著地随 DNA 分子的构型和吸附剂的类型而变化. DNA 在黏土矿物上的吸附是依赖 pH 的变化^[3], 随 pH 的降低,其吸附量增加^[3]; 提高补偿离子的价数和浓度,DNA 在矿物表面的吸附量增加^[15].

已有的 DNA 吸附研究主要集中在 2:1 型层状硅酸盐矿物表面,然而 DNA 在层状硅酸盐矿物表面吸附的结果并不能应用在可变电荷的土壤或矿物上. 蒙脱土、高岭土和针铁矿是土壤中普遍存在的层状硅酸盐矿物和氧化物,已有的研究以 Tris 缓冲液作为的背景溶液,它会显著增加 DNA 在这几种矿物表面吸附,且所使用的 DNA 浓度 < 140 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[15,18]; 然而,在土壤溶液中存在 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等阳离子,土壤溶液不同于 Tris 缓冲液,DNA 在高浓度(100 ~ 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)下可变电荷矿物表面吸附特征并不清楚. 本实验是在不同电解质体系、不同溶液 pH 值和 DNA 溶液高浓度下,研究 DNA 在高岭土、蒙脱土和针铁矿的吸附与解吸特征,以期为基因修正生物体释放 DNA 的风险评价和提取土壤中 DNA 提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试样品

1.1.1 矿物样品准备

针铁矿的制备:按文献[19]的方法合成. 在含有 50 g $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 的 825 mL 水溶液中,于充分搅拌下缓慢滴加 200 mL 2.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KOH 溶液,至溶液 pH 为 12,然后在 60℃ 下老化 24 h,用砂芯漏斗抽滤,并用 pH 9.0 的 KOH 溶液洗涤沉淀,再用 95% 去离子水和酒精洗涤 3 次,60℃ 下干燥 24 h,过 100 筛,贮存,备用.

表 1 矿物的基本性质

Table 1 Basic properties of minerals			
矿物	表面积/ $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	电荷零点 ZPC
高岭土	22.9	7.1	3.61
蒙脱土	94.9	90.2	2.49
针铁矿	101.6		8.26

蒙脱土及高岭土:钠基蒙脱土产自河南信阳,高岭土购自上海三浦化工有限公司. 用虹吸法取 < 2.0 μm 颗粒,过 120 目筛,用 0.1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液进行 Na^+ 交换 4 次,洗至 AgNO_3 检测无 Cl^- ,60℃ 干燥 16 h,然后过 120 目筛备用. 比表面积的测定用 BET- N_2 吸附法,阳离子代换量的测定采用 pH 7.0 乙酸铵法,电荷零点采用盐滴定-电位滴定法

(ST-PT)^[20]测定.

1.1.2 供试 DNA

供试 DNA 样品购自德国 Sigma Chemical Co., St. Louis, Mo. 公司生产的鲑鱼精子 DNA(平均大小 1 000 bp). 国内外研究者所大多采用这种 DNA^[15,16,21,22]. DNA 溶解在 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸-醋酸钠缓冲液中(pH 为 5.5),用紫外分光光度计在 260 nm 和 280 nm 下分别测定吸光值, $A_{260}:A_{280} = 1.88$,表明不含蛋白质.

1.2 研究方法

1.2.1 不同 pH 值 DNA 溶液的配制

将 DNA 溶解在 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的醋酸-醋酸钠缓冲液中,使 DNA 浓度为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶液分别用 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl、0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl、0.03 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 和 0.03 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2 作为支持电解质,用醋酸和 NaOH 分别调节 DNA 溶液的 pH 为 2.0 ~ 8.0,即为实验所用溶液.

1.2.2 DNA 的平衡吸附与解吸

不同 pH 条件下 DNA 的平衡吸附实验:在 25℃,准确称取 0.050 0 g 矿物胶体,分别加入不同 pH 值的上述 DNA 溶液 8 mL,在振荡机上往复振荡 2 h,取下静置,24 h 后,在 8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心,并分别测上清液 pH 值及 DNA 吸光值. DNA 的加入量减去上清液中残留 DNA 量,即为矿物对 DNA 的吸附量,实验重复 3 次.

DNA 的解吸附实验:NaCl 体系的上述沉淀物用 8 mL 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸钠(pH 为 7.3)重复洗涤,每次分别测上清液 pH 值和吸光值,直至上清液检测不出 DNA 时,再用 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸二氢钠(pH 为 4.5)洗涤一次,分别测得的值即为 DNA 的解吸量.

平衡等温吸附实验:在 25℃,准确称取 0.050 0 g 矿物胶体,分别加入浓度为 0、50、100、200、400、600、800、1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 DNA 溶液 8 mL(分别为 pH 3.5 和 pH 5.0),体系均以 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 作为支持电解质,后在振荡机上往复振荡 2 h,取下静置,24 h 后,在 8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心,并分别测上清液 pH 值及 DNA 吸光值. DNA 的加入量减去上清液中残留 DNA 量即为土壤胶体对 DNA 的吸附量,实验重复 3 次.

1.3 测定方法

DNA 用 UV3100 分光光度计测量;pH 值用玻璃电极测定(江苏电分析仪器厂生产,231C 型),参比电极为饱和甘汞电极.

2 结果与分析

2.1 矿物吸附 DNA 前后溶液 pH 值的变化

图 1 可以看出,吸附 DNA 后溶液 pH 值与吸附前 DNA 溶液 pH 值有明显变化,尤其在溶液 pH 值 >5.0 时变化较为明显.

在 NaCl 电解质体系中[图 1(a)],针铁矿与蒙脱土吸附后溶液 pH 值变化均高于吸附 DNA 前溶液 pH 值,高岭土吸附后溶液 pH 值与吸附前基本保持一致.经方差分析,在整个供试 pH 范围内,针铁矿和蒙脱土吸附 DNA 前后溶液 pH 值变化与高岭土的差异极显著.

在 KCl、CaCl₂ 和 MgCl₂ 电解质体系中[图 1

(b)、1(c)和 1(d)],吸附前溶液 pH <5.0 时,3 种矿物吸附 DNA 后溶液 pH 值与吸附前基本保持一致.在 KCl 电解质体系中,在吸附前 DNA 溶液 pH 为 6.0 时,3 种矿物吸附 DNA 后溶液 pH 值为 7.0 左右,当吸附前 DNA 溶液 pH 值为 8.0 时,吸附后溶液 pH 值均低于 8.0;在 CaCl₂ 电解质体系中,当吸附前 DNA 溶液 pH 为 6.0 时,蒙脱土与高岭土比吸附 DNA 后溶液 pH 值上升 0.4 ~ 0.7 个单位,针铁矿的下降 0.6 个单位;在 MgCl₂ 电解质中,当吸附前 DNA 溶液 pH 为 6.0 时,3 种矿物比吸附 DNA 后溶液 pH 值上升 0.3 ~ 0.8 个单位.当吸附前 DNA 溶液 pH 为 8.0 时,CaCl₂ 和 MgCl₂ 电解质体系中,3 种矿物吸附 DNA 后溶液 pH 值均低于 7.0.

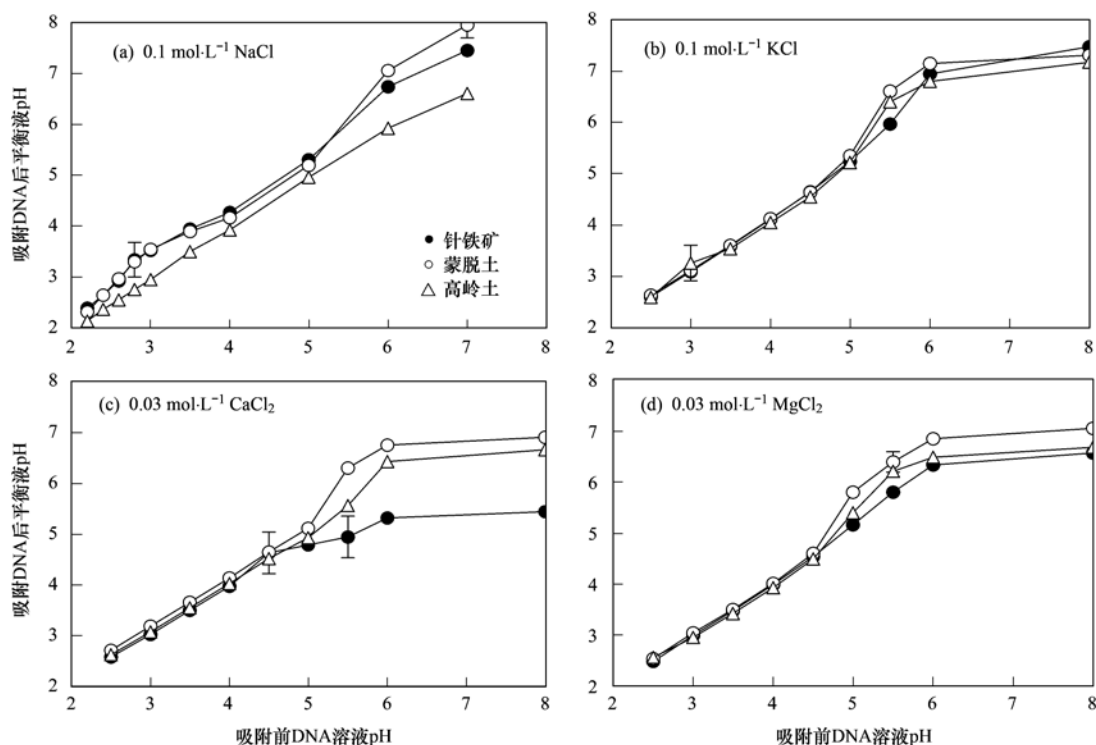


图 1 吸附前后 DNA 溶液 pH 的变化

Fig. 1 pH of DNA solution before and after adsorption

2.2 不同 pH 下矿物吸附 DNA 的特征

不同 pH 下矿物吸附 DNA 特点如图 2,在 4 种不同电解质下,3 种矿物对 DNA 的吸附存在明显差异.

在 NaCl 电解质中,针铁矿对 DNA 的吸附率从 pH 为 2.5 时的 75% 升高至 pH 为 3.3 时的 91%;随着 pH 值的升高,针铁矿对 DNA 的吸附未继续增加.当溶液 pH 值为 2.2 ~ 4.0 时,蒙脱土对 DNA 的吸附率约为 95%,当溶液 pH 值从 4.0 继续上升至 pH 为 7.0 时,其对 DNA 的吸附率开始大幅下降,吸

附率下降至 25%;高岭土对 DNA 的吸附率在整个供试 pH 值范围内则随着 pH 的升高而减少,从 pH 为 2.2 时的 85% 减少至 pH 为 7.0 时的 18%.在 KCl 电解质体系中,矿物对 DNA 的吸附类似于 NaCl 电解质体系.

在 CaCl₂ 电解质体系中,针铁矿从 pH 2.5 时对 DNA 的吸附率 75% 上升到 pH 5.0 时的 94%.蒙脱土对 DNA 的吸附率随 pH 值升高略有下降,吸附率从 93% 下降到 90%,高岭土溶液 pH 值 <3.6 时, DNA 吸附率最大,为 90%,pH >3.6 时, DNA 吸附

率开始下降,下降至 57%。在 MgCl_2 电解质体系中,蒙脱土和针铁矿对 DNA 的吸附率保持在 92% 左

右,高岭土对 DNA 吸附率从 pH 3.6 时的 92% 开始下降,下降至 47%。

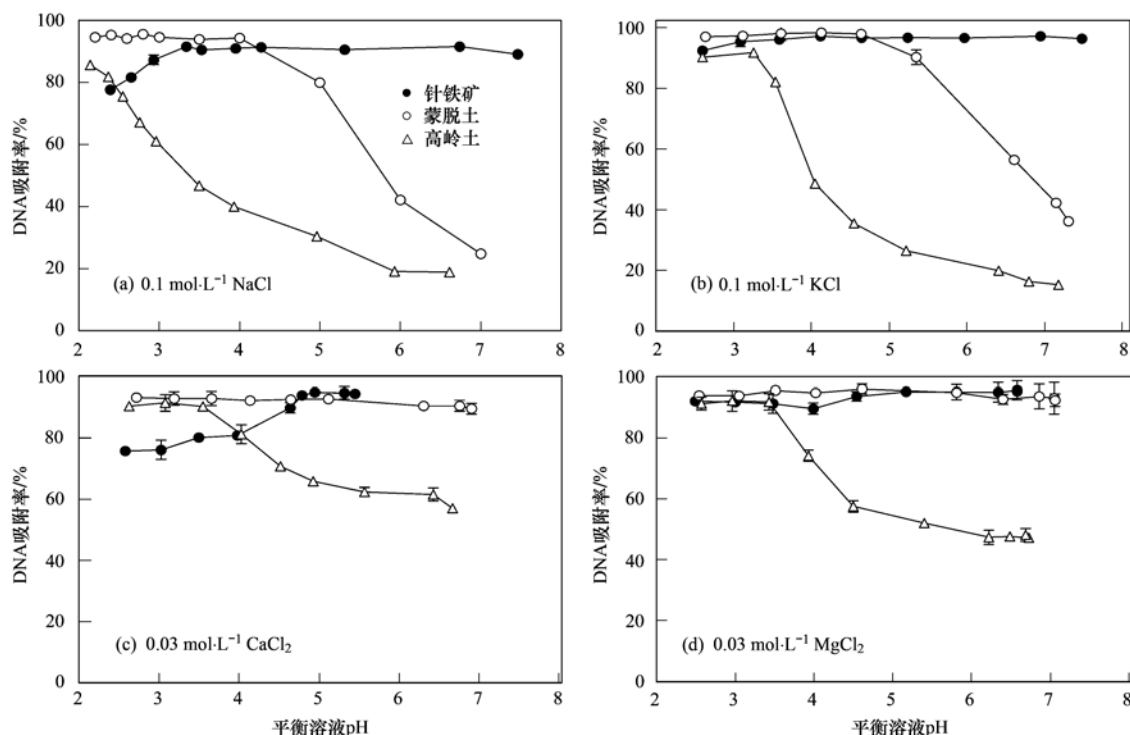


图 2 平衡溶液 pH 条件下矿物对 DNA 的吸附率

Fig. 2 Adsorption percentage of DNA on minerals at equilibrium solution pH

2.3 矿物表面的 DNA 平衡等温吸附

pH 为 3.5 时,针铁矿和蒙脱土在平衡液中 DNA 浓度较低时,吸附等温线的斜率较大,吸附量随 DNA 浓度的增加上升较快,其吸附曲线为 H 型,针铁矿和蒙脱土则在供试 DNA 浓度中未显示接近饱和状态;高岭土随平衡液中 DNA 浓度继续上升,吸附量变化不大,表明吸附接近饱和,吸附曲线为 L 型。pH 为 5.0 时的针铁矿中,低浓度的平衡液中,其吸附曲线亦为 H 型,而在蒙脱土和高岭土中,DNA 吸附量随平衡液中 DNA 浓度的增加而缓慢上升,吸附曲线为 L 型^[23]。

以 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 为支持电解质,DNA 的吸附等温曲线(如图 3)和方程的决定系数 R^2 (表 2)显示,Freundlich 等温吸附模型能更好地拟合 3 种供试矿物对 DNA 的吸附。Freundlich 吸附模型描述物质在能量分布不均一表面的吸附现象,其 k 代表相对吸附容量(表 2), k 值越大,吸附容量越大,蒙脱土的相对吸附容量在 pH 3.5 时大于针铁矿的,而 pH 5.0 时小于针铁矿的;吸附亲和力参数 $1/n$,表示在不同 pH 值下 3 种矿物对 DNA 吸附亲和力有明显差异,造成差异的原因可能是溶液 pH 值引起的。

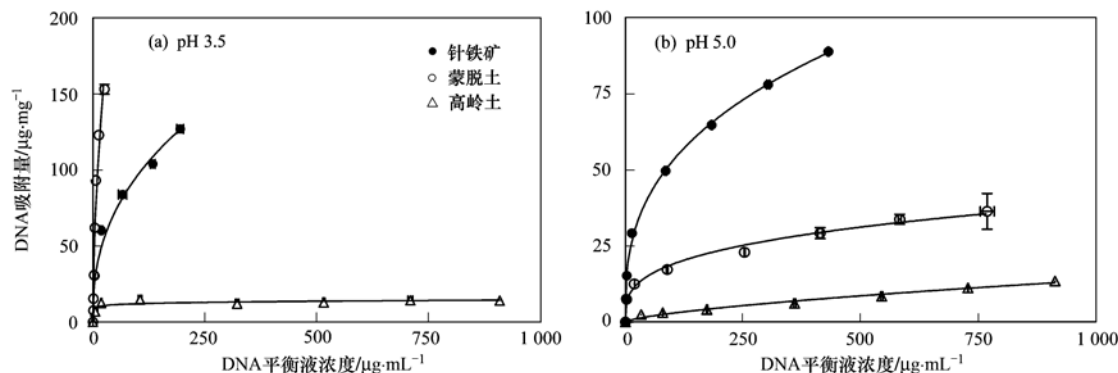


图 3 矿物对 DNA 的 Freundlich 等温吸附曲线

Fig. 3 Freundlich adsorption isotherms of DNA on minerals

表 2 矿物吸附 DNA 拟合 Freundlich 方程的有关参数

矿物	Freundlich equation $Q_e = k \cdot c_e^{1/n}$					
	pH 3.5			pH 5.0		
	k	$1/n$	R^2	k	$1/n$	R^2
针铁矿	14.7	0.41	0.980	10.4	0.35	0.998
蒙脱土	23.9	0.59	0.938	4.6	0.31	0.986
高岭土	8.5	0.08	0.884	0.13	0.67	0.980

1) Q 为吸附量 ($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$), R^2 为决定系数, $1/n$ 为经验常数

2.4 矿物吸附 DNA 的解吸特征

NaCl 电解质体系 DNA 被矿物吸附后, 用 NaOAc 溶液和 NaH_2PO_4 溶液为解吸剂, NaOAc 解吸的是通过分子引力或静电引力吸附的 DNA, NaH_2PO_4 解吸的主要是通过配位交换吸附的 DNA^[15, 24].

图 4(a) 可以看出, 以 NaOAc 为解吸剂, 针铁矿吸附的 DNA 基本解吸不出, 蒙脱土和高岭土解吸率较高. 针铁矿、蒙脱土和高岭土上吸附 DNA 的解吸率分别为 0.1% ~ 0.4%、63.7% ~ 90.2% 和 29.7% ~ 87.5%, 经方差分析, 上述 pH 值情况下, 针铁矿与蒙脱土和高岭土矿物间的解吸率差异极显著, 且随 pH 上升, DNA 的解吸率逐渐下降, pH 5.0 与 pH 7.0 时蒙脱土与高岭土矿物间的解吸率差异也是极显著.

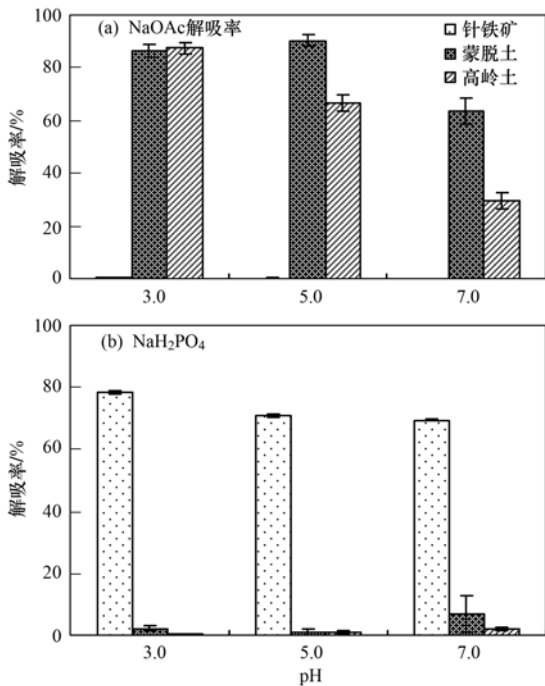


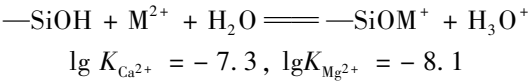
图 4 不同解吸剂对矿物吸附 DNA 的解吸率 (NaCl 电解质)
Fig. 4 Desorption ratio of DNA adsorbed on minerals at different solutions (NaCl electrolyte)

图 4(b) 当以 NaH_2PO_4 为解吸剂时, 针铁矿吸附的 DNA 解吸率较高. 针铁矿、蒙脱土和高岭土上吸附 DNA 的解吸率分别为 69.6% ~ 78.7%、0.8% ~ 7.0% 和 0.4% ~ 2.2%. 在上述 pH 条件下, 蒙脱土和高岭土的解吸率差异不显著.

3 讨论

吸附平衡体系 pH 值的变化与矿物的理化性质有密切关系. 带负电荷的蒙脱土由于静电作用, 容易吸附 DNA 溶液中的 H^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 而不易吸附 Na^+ , Na^+ 且起着分散胶体的作用^[25], 可能与蒙脱土对 H^+ 的吸附力大于 Na^+ 的吸附力有关, 所以在 NaCl 溶液体系 pH 值上升幅度大于其它 3 种电解质体系. 高岭土表面的负电荷量仅仅 $7.0 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 负电位的效应并没有表现出来, 在 $\text{pH} < 5$ 时, 平衡前与平衡后溶液 pH 值没有变化. 针铁矿电荷零点 ZPC 为 8.26, 在 NaCl 体系矿物表面质子化特别明显^[26], 溶液 pH 值上升; 在 CaCl_2 电解质体系, 溶液当 $\text{pH} > 5.0$ 时, 针铁矿增加对 Ca^{2+} 的专性吸附, 会释放一部分 H^+ , 导致 pH 值降低^[27~29].

当 DNA 被矿物胶体吸附时, 溶液体系 pH 值的变化还与 DNA 自身的性质有关^[2, 9, 15, 16]. DNA 的等电点大约为 5.0^[2], 体系 $\text{pH} < 5.0$, DNA 分子中的腺嘌呤、鸟嘌呤和胞嘧啶上的氨基基团发生质子化, 这些正电荷基团做为阳离子与矿物表面的永久负电荷相互作用; 在 $\text{pH} 8.0$, 核酸分子暴露出负电荷的磷酸根基团和不带电荷的核糖通过阳离子盐桥和氢键吸附到矿物表面和边面^[30]. 在 NaCl 电解质体系, 在 $\text{pH} < 5$ 时, 氨基基团可能发生质子化消耗 H^+ , 会引起溶液 pH 值的上升, 在其它电解质溶液体系, K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 可能会阻碍氨基基团发生质子化, 溶液 pH 值的的变化不明显^[26]; 当体系 pH 为 5.0 ~ 6.0, 矿物会吸附溶液中的 H^+ 质子, 从而使溶液 pH 值升高幅度加大; 在二价电解质体系, 当加入 DNA 溶液 pH 为 8.0 时, 体系 pH 值 < 7.0 , 说明有质子的释放, 有可能是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子可键合硅烷醇和铁醇, 释放质子^[31, 32], 其反应如下:



影响 DNA 的吸附有较多因素, 如矿物的电荷状况、溶液 pH 和电解质种类和浓度等, 无机阳离子浓度增加或体系 pH 下降, 有利于降低负电荷阴离子与矿物表面的静电排斥, 会增加核酸分子吸附或键合到矿物表面^[33]. 3 种矿物对 DNA 的吸附量因体系

pH 和电解质溶液不同而变化,在强酸性 pH 2 ~ pH 5 溶液, DNA 在 3 种矿物表面表现为最大吸附量, 吸附率约为 80% ~ 98%, 降低 pH 值会显著增加 DNA 的吸附^[3,10,30]. 在一价电解质体系, DNA 在层状矿物如蒙脱土和高岭土上的吸附随溶液 pH 的上升而下降, 蒙脱土吸附的 DNA 从 90% 下降到 25% ~ 35%, 高岭土吸附的 DNA 从 87% 下降到 35%; 但二价电解质体系, 蒙脱土吸附 90% 以上 DNA, 且不受 pH 的影响; 而高岭土吸附 DNA 受到 pH 的影响, 随溶液 pH 的上升而下降, 只是下降幅度小于一价电解质体系, 大约下降到 50% 左右. 在 pH > 5 时, 二价阳离子的存在会增加蒙脱土和高岭土上 DNA 分子的吸附^[34,35]. 二价离子具有比一价离子高的亲和力, 它们有能力抵消 DNA 的负电荷^[24]. 从数量上说, 二价电解质体系比一价电解质体系吸附 DNA 的数量要高^[35~37]. Ca^{2+} 离子与 DNA 分子末端的磷酸基团形成内圈络合物, Mg^{2+} 与 DNA 分子末端的磷酸基团形成更弱的外圈络合物, 降低净负电荷, 降低了磷酸根间的静电排斥力, 导致更紧密的 DNA 分子结构^[38]. 然而, 阳离子作用在介入 DNA 吸附过程仍然是矛盾的^[9], 在 NaCl 和 CaCl_2 电解质体系 pH < 3 时, 针铁矿对 DNA 吸附率约为 80%, 在电解质溶液 pH > 3.0 时, DNA 吸附率约为 90% ~ 95%, 在 KCl 和 MgCl_2 电解质体系, 针铁矿对 DNA 吸附率不受 pH 的影响, 保持在 92% ~ 97%. Saeki 等^[12] 研究在 pH 6.8 ~ 7.0 时 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 溶液电解质体系, 针铁矿的吸附率分别为 86.4%.

关于矿物胶体对 DNA 的吸附, 已经提出了静电引力、氢键结合、脱水作用、配位交换及范德华力等机制^[7,9,34]. NaOAc 解吸以静电引力吸附在胶体上的 DNA 分子, 而 NaH_2PO_4 解吸的是配位体交换吸附于胶体上的 DNA^[15,39,40], 因而用这种方法来区分 DNA 在矿物表面的吸附机制.

上述实验 NaOAc 解吸结果表明, 在 pH < 5.0 时, 蒙脱土上 86% ~ 90% 的 DNA 吸附是静电力的吸附, 在高岭土上为 66% ~ 87%; 在 pH = 7.0 时, 蒙脱土上 63% 的 DNA 吸附是静电力的吸附, 在高岭土上为 30%; 这表明在蒙脱土和高岭土上主要表现为静电作用力. 与高岭土相比, 蒙脱土具有巨大的表面积, 单位质量提供的吸附点位多^[24], 能通过阳离子形成盐桥吸附更多的 DNA 分子^[1,3]. 而矿物对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子的吸附力大于 Na^+ 离子^[22], 所以在其它 3 种电解质体系吸附的 DNA 量比 NaCl 体系略高. 在体系 pH < 5.0 时, 针铁矿表面和 DNA

分子都带正电荷, 针铁矿通过静电引力所吸附的 DNA 为 0.05% ~ 0.4%, DNA 分子末端的磷酸基团带负电荷, 有可能通过静电吸附极少部分 DNA.

针铁矿主要通过配位体交换的方式吸附 DNA, 其 NaH_2PO_4 解吸率为 70% ~ 78%, DNA 分子末端的磷酸基团直接与铁铝氧化物表面—OH 通过配位体交换. 蒙脱土和高岭土上 NaH_2PO_4 解吸率分别为 1% ~ 7% 和 0.4% ~ 2%; 有的研究者认为, DNA 分子末端磷酸基团的一 OH, 与层状硅酸盐矿物, 如蒙脱土边面的一 OH 和高岭土边缘的一 OH 也能进行配位体交换^[1,33,40,41]. 从总解吸率来看, 3 种矿物至少有 10% ~ 30% 的没有被 NaH_2PO_4 解吸, 可能是更强烈的键合作用.

4 结论

(1) 吸附 DNA 后溶液 pH 值与吸附前 DNA 溶液 pH 值有明显变化, 尤其在溶液 pH 值 > 5.0 时变化较为明显, 特别是在 CaCl_2 电解质体系中, 当吸附前 DNA 溶液 pH > 6.0 时, 针铁矿下降 0.6 ~ 2.5 个单位.

(2) 在 4 种不同电解质和 pH 条件下, 3 种矿物对 DNA 的吸附存在明显差异. 针铁矿对 DNA 的吸附率大约为 75% ~ 91%, 高岭土对 DNA 的吸附率从 pH 为 3.5 时的 90% 开始下降, 至 pH 6 ~ 7 时的下降至大约 18% ~ 50%. 在一价电解质体系, 当溶液 pH 值为 2.2 ~ 5.0 时蒙脱土对 DNA 的吸附率大约为 90% 开始下降至 25% ~ 40%, 但在二价电解质体系蒙脱土对 DNA 的吸附率大约为 92%.

(3) 矿物表面的 DNA 平衡等温吸附曲线为 H 或 L 型, Freundlich 等温吸附方程能更好的拟合 3 种矿物对 DNA 的吸附. 蒙脱土对 DNA 相对吸附容量在 pH 3.5 时大于针铁矿, 而 pH 5.0 时小于针铁矿.

(4) 以 NaOAc 为解吸剂, 针铁矿、蒙脱土和高岭土上吸附 DNA 的在不同 pH 时解吸率分别为 0.1% ~ 0.4%、63.7% ~ 90.2% 和 29.7% ~ 87.5%. 以 NaH_2PO_4 为解吸剂时这些矿物吸附 DNA 的解吸率分别为 69.6% ~ 78.7%、0.8% ~ 7.0% 和 0.4% ~ 2.2%.

参考文献:

- [1] Paget E, Monrozier L J, Simonet P. Adsorption of DNA on clay minerals: protection against DNaseI and influence on gene transfer[J]. FEMS Microbiology Letters, 1992, 97(1-2): 31-40.
- [2] Stotzky G. Persistence and biological activity in soil of

- insecticidal proteins from *Bacillus thuringiensis* and of bacterial DNA bound on clays and humic acids [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(3): 691-705.
- [3] Khanna M, Stotzky G. Transformation of *Bacillus subtilis* by DNA bound on montmorillonite and effect of DNase on the transforming ability of bound DNA [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1992, **58**(6): 1930-1939.
- [4] Lorenz M G, Wackernagel W. Bacterial gene transfer by natural genetic transformation in the environment [J]. *Microbiological Review*, 1994, **58**(3): 563-602.
- [5] 张瑞福, 曹慧, 崔中利, 等. 土壤微生物总 DNA 的提取和纯化[J]. *微生物学报*, 2003, **43**(2): 276-282.
- [6] 杨朝晖, 肖勇, 曾光明, 等. 用于分子生态研究的堆肥 DNA 提取方法[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1613-1617.
- [7] Melzak K A, Sherwood C S, Turner R F B, *et al.* Driving forces for DNA adsorption to silica in perchlorate solutions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, **181**(2): 635-644.
- [8] Sun L L, Zhao D X, Zhang Y, *et al.* DNA adsorption and desorption on mica surface studied by atomic force microscopy [J]. *Applied Surface Science*, 2011, **257**(15): 6560-6567.
- [9] Pietramellara G, Franchi M, Gallori E, *et al.* Effect of molecular characteristics of DNA on its adsorption and binding on homoionic montmorillonite and kaolinite[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, **33**(5): 402-409.
- [10] Crecchio C, Stotzky G. Binding of DNA on humic acids: effect on transformation of *Bacillus subtilis* and resistance to DNase[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, **30**(8-9): 1061-1067.
- [11] Saeki K, Ihyo Y, Sakai M, *et al.* Strong adsorption of DNA molecules on humic acids[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2011, **9**(4): 505-509.
- [12] Saeki K, Sakai M, Wada S I. DNA adsorption on synthetic and natural allophanes[J]. *Applied Clay Science*, 2010, **50**(4): 493-497.
- [13] Cai P, Huang Q Y, Zhang X W. Microcalorimetric studies of the effects of $MgCl_2$ concentrations and pH on the adsorption of DNA on montmorillonite, kaolinite and goethite [J]. *Applied Clay Science*, 2006, **32**(1-2): 147-152.
- [14] Saeki K, Kunito T. Adsorptions of DNA molecules by soils and variable-charged soil constituents [J]. *Current Research: Technology and Education Topics*, 2010, **2**: 188-195.
- [15] Cai P, Huang Q, Zhang X, *et al.* Adsorption of DNA on clay minerals and various colloidal particles from an Alfisol[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, **38**(3): 471-476.
- [16] Cai P, Huang Q Y, Zhang X W. Interactions of DNA with clay minerals and soil colloidal particles and protection against degradation by DNase [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(9): 2971-2976.
- [17] 王代长, 王慎阳, 蒋新, 等. 可变电荷与恒电荷土壤胶体对 DNA 吸附与解吸特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(9): 300-306.
- [18] Saeki K, Kunito T, Sakai M. Effect of Tris-HCl Buffer on DNA adsorption by a variety of soil constituents[J]. *Microbes and Environments*, 2011, **26**(1): 88-91.
- [19] Atkinson R J, Posner A M, Quirk J P. Adsorption of potential-determining ions at the ferric oxide-aqueous electrolyte interface [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1967, **71**(3): 550-558.
- [20] Sakurai K, Ohdate Y, Kyuma K. Potentiometric automatic titration method to evaluate zero point of charge of variable charge soils[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 1989, **35**(1): 89-100.
- [21] Teeters M A, Root T W, Lightfoot E N. Adsorption and desorption behavior of plasmid DNA on ion-exchange membranes: Effect of salt valence and compaction agents [J]. *Journal of Chromatography*, 2004, **1036**(1): 73-78.
- [22] Cárdenas M, Nylander T, Lindman B. DNA and cationic surfactants at solid surfaces [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, **270-271**(1-3): 33-43.
- [23] Hinz C. Description of sorption data with isotherm equations[J]. *Geoderma*, 2001, **99**(3-4): 225-243.
- [24] Franchi M, Ferris J P, Gallori E. Cations as mediators of the adsorption of nucleic acids on clay surfaces in prebiotic environments[J]. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 2003, **33**(1): 1-16.
- [25] Bartoli F, Burtin G, Herbillon A J. Disaggregation and clay dispersion of Oxisols: Na resin, a recommended methodology [J]. *Geoderma*, 1991, **49**(3-4): 301-317.
- [26] 朱茂旭, 蒋新, 季国亮. 可变电荷土壤和恒电荷土壤与氢离子的反应动力学[J]. *环境科学*, 2001, **22**(3): 49-53.
- [27] Ali M A, Dzombak D A. Effects of simple organic acids on sorption of Cu^{2+} and Ca^{2+} on goethite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**(2): 291-304.
- [28] Rietra R P J J, Hiemstra T, Van Riemsdijk W H. Interaction between calcium and phosphate adsorption on goethite [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(16): 3369-3374.
- [29] Weng L P, Koopal L K, Hiemstra T, *et al.* Interactions of calcium and fulvic acid at the goethite-water interface [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(2): 325-339.
- [30] Khanna M, Yoder M, Calamai L, *et al.* X-ray diffractometry and electron microscopy of DNA from *Bacillus subtilis* bound on clay minerals[J]. *Sciences of Soils*, 1998, **3**(1): 1-10.
- [31] Cheng H, Zhang K, Libera J A, *et al.* Polynucleotide adsorption to negatively charged surfaces in divalent salt solutions [J]. *Biophysical Journal*, 2006, **90**(4): 1164-1174.
- [32] Stumm W, Hohl H, Dalang F. Interaction of metal ions with hydrous oxide surfaces[J]. *Croatica Chemica Acta*, 1976, **48**(4): 491-504.
- [33] Lorenz M G, Wackernagel W. Adsorption of DNA to sand and variable degradation rates of adsorbed DNA[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987, **53**(12): 2948-2952.
- [34] Levy-Booth D J, Campbell R G, Gulden R H, *et al.* Cycling of extracellular DNA in the soil environment[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, **39**(12): 2977-2991.

- [35] Saeki K, Kunito T, Sakai M. Effects of pH, ionic strength, and solutes on DNA adsorption by andosols[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, **46**(5): 531-535.
- [36] Goring C A I, Bartholomew W V. Adsorption of mononucleotides, nucleic acids, and nucleoproteins by clays [J]. *Soil Sciences*, 1952, **74**(2): 149-164.
- [37] Romanowski G, Lorenz M G, Wackernagel W. Adsorption of plasmid DNA to mineral surfaces and protection against DNase I [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, **57**(4): 1057-1061.
- [38] Poly F, Chenu C, Simonet P, *et al.* Differences between linear chromosomal and supercoiled plasmid DNA in their mechanisms and extent of adsorption on clay minerals[J]. *Langmuir*, 2000, **16**(3): 1233-1238.
- [39] Saeki K, Morisaki M, Sakai M. The contribution of soil constituents to adsorption of extracellular DNA by soils [J]. *Microbes and Environments*, 2008, **23**(4): 353-355.
- [40] Pietramellara G, Ascher J, Ceccherini M T, *et al.* Adsorption of pure and dirty bacterial DNA on clay minerals and their transformation frequency [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, **43**(6): 731-739.
- [41] Pietramellara G, Ascher J, Borgogni F, *et al.* Extracellular DNA in soil and sediment: fate and ecological relevance[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, **45**(3): 219-235.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbiantan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人