

# 离子强度及 pH 对不同类型土壤中胶体释放的影响

吕雪艳<sup>1</sup>, 姚 遥<sup>1</sup>, 孙媛媛<sup>1\*</sup>, 吴吉春<sup>1\*</sup>, 郭红岩<sup>2</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院水科学系 表生地球化学教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 采用实验室土柱纵向淋溶法, 研究了离子强度及 pH 变化对常熟乌栅土原状、扰动土柱以及东北黑土、江西红壤扰动土柱土壤胶体释放的影响。结果表明离子强度变化对我国不同类型土壤胶体释放影响不同: 淋洗液电解质为 NaCl 时, 对于常熟乌栅土以及东北黑土, 离子强度减小促进胶体的释放, 反之抑制胶体的释放; 对于江西红壤, 离子强度变化对土壤胶体释放则不产生影响。淋洗液电解质为 CaCl<sub>2</sub> 条件下, 土壤胶体的释放量低于淋洗液为 NaCl, 且离子强度变化对三种土壤胶体的释放均不产生明显影响。相同条件下, 常熟乌栅土及东北黑土胶体释放量远远大于江西红壤, pH 变化则对上述类型土壤胶体释放的影响不明显。研究结果有助于进一步阐明水化学条件的变化对我国不同类型土壤胶体释放的影响规律。

**关键词:** 土壤胶体; 释放; 离子强度; pH; 扰动土柱; 原状土柱

中图分类号: S153 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)07-1358-08 doi:10.11654/jaes.2014.07.015

## Effects of Ionic Strength and pH on Colloid Release from Different Soils

LÜ Xue-yan<sup>1</sup>, YAO Yao<sup>1</sup>, SUN Yuan-yuan<sup>1\*</sup>, WU Ji-chun<sup>1</sup>, GUO Hong-yan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education, School of Earth Sciences and Engineering, Department of Hydrosociences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. School of Environment, State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Colloid mobilization would facilitate pollutant transport in the environment. In laboratory, leaching experiments were performed to investigate the effects of ionic strength and pH on colloid release from undisturbed and disturbed Wushan soil columns from Changshu, disturbed black soil column from northeast China (Dongbei) and disturbed red soil column from Jiangxi. The effects of ionic strength on colloid release were significantly different in various soils. In the electrolyte NaCl system, increasing ionic strength obviously reduced the release capacity of soil colloids for Changshu Wushan soil and Dongbei black soil, while ionic strength had little effects on colloid release in Jiangxi red soil. In electrolyte CaCl<sub>2</sub> system, however, ionic strength had no significant impacts on soil colloid release. Moreover, colloid release was much smaller in CaCl<sub>2</sub> than in NaCl. Under the same conditions of solution chemistry, the amount of colloid released was far greater in Changshu Wushan soil and Dongbei black soil than in Jiangxi red soil. pH showed little influence on colloid release. The research findings would be useful for further understanding the impacts of water chemical conditions on colloid release of different soils.

**Keywords:** soil colloid; release; ionic strength; pH; disturbed column; undisturbed column

地下环境中含有众多胶体, 主要包括黏土和铁氧化物等矿物颗粒、土壤有机质-矿物复合物、天然有机大分子(如可溶性腐植酸), 此外还包括微生物及其分泌物等。胶体具有巨大的比表面积和众多的表面反应

点, 使得它们对污染物具有很高的亲和力。研究发现, 胶体在地下环境的运移速率很快, 当污染物强烈吸附于胶体并不可逆时, 地下环境中的胶体作为污染物的载体, 可为原来不易移动的污染物提供一条快速运移的捷径 (Colloid facilitated transport), 从而明显影响污染物运移的净速率<sup>[1-2]</sup>。因此, 研究地下环境中胶体的产生机制及运移过程, 对于进一步阐述污染物在地下环境中的运移行为, 具有重要意义。

地下环境中移动的胶体颗粒大多数来源于母质颗粒的释放和分离过程<sup>[3-4]</sup>, 但其产生机制和影响因素

收稿日期: 2014-01-01

基金项目: 国家自然科学基金(41030746, 41372234); 教育部博士点基金(20110091110039)

作者简介: 吕雪艳(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水环境化学。

E-mail: mg1229067@smail.nju.edu.cn

\*通信作者: 孙媛媛 E-mail: sunyy@nju.edu.cn

吴吉春 E-mail: jcwu@nju.edu.cn

异常复杂。近年来的研究表明,孔隙水化学条件发生变化尤其是离子强度和pH的变化时,对胶体颗粒与土壤团粒的分离以及随后在地下环境中的运移具有重要的影响。如Grolimund<sup>[5]</sup>研究表明孔隙水在离子强度降低的过程中会促进土壤介质中胶体的释放;Grolimund和Borkovec<sup>[6]</sup>进一步发现孔隙水中单价阳离子浓度降低会促进土壤和地下含水层中胶体的释放,而二价阳离子钙则不具备此效应。国内胡俊栋等<sup>[7-8]</sup>也发现高pH和低离子强度条件有利于土壤胶体的释放与迁移。

我国地域辽阔,不同类型的土壤性质差异甚大。水化学条件变化(离子强度和pH变化等)对我国不同性质土壤中胶体的释放及运移的影响是否相同,目前相关研究还很不足。此外,目前的研究主要集中在扰动土样中进行的,对在原状土条件下胶体产生的机制及运移影响因素的研究还很少,难以反映野外的真实情况。因此,本文以常熟乌栅土、东北黑土及江西红壤三种土质差异较大的土壤为对象,结合扰动土柱和不同长度的原状土柱(20 cm和40 cm)试验,重点研究孔隙水离子强度及pH变化对不同类型土壤中胶体释放的影响,为进一步阐述胶体促使污染物运移机理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验选取具有代表性的常熟乌栅土、东北黑土以及江西红壤为供试土壤。取0~20 cm的表层土壤,风干后研磨过2 mm筛备用,其基本理化性质见表1。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 原状土柱实验

从江苏省常熟市的野外农田采集原状土柱。将柱长20 cm与40 cm、直径均为15 cm的两种PVC管垂直放在去除约3 cm表土的地面,管上方水平放置木板,连续适度敲击木板,待管降至柱长高度后取出备用。20 cm和40 cm土柱的土壤孔隙度分别为0.607和0.528。在土柱底座铺设50目不锈钢纱网和2 cm粗砂砾(过滤大粒径土壤颗粒),用初始条件溶液从底

端超过24 h缓慢饱和土柱。参照相关文献方法<sup>[9]</sup>,通过蠕动泵控制模拟降水装置的降水速率,以稳定速率向饱和土柱供液淋滤。实验过程中改变淋滤液的离子强度和pH。定期取样,分析渗滤液的胶体浓度。

#### 1.2.2 扰动土柱实验

参照相关文献方法<sup>[10]</sup>,取过筛风干的土壤填装扰动土柱。土柱柱长15 cm,内径5 cm,底层铺设50目不锈钢纱网和2 cm粗砂砾。常熟乌栅土、东北黑土以及江西红壤土柱孔隙度分别为0.608、0.632以及0.578。用初始条件溶液从底端超过24 h缓慢饱和土柱,蠕动泵控制流速进行淋滤实验。实验过程中改变淋滤液的离子强度和pH。定期取样,分析渗滤液的胶体浓度。

#### 1.2.3 胶体浓度分析

取风干过筛的土壤40 g置于2 L的5 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl溶液中制成悬液,磁力搅拌1 h后静置2 h。根据Stokes定律,此时悬浮液中的粒子浓度小于2.0 μm。取30 mL悬浮液,过0.2 μm滤膜,测定滤膜过滤前后的质量差,即为溶液中粒子的质量。按不同比例连续稀释此悬浊液,并测定相应粒子质量。用紫外分光光度计在400 nm波长测定各溶液的吸光度<sup>[11]</sup>,分析得到吸光度与胶体浓度的标准曲线。在400 nm波长测定实验样品的吸光度,通过标准曲线转化成胶体的浓度,测定胶体的释放量。

#### 1.2.4 Zeta 电位分析

根据1.2.3,分别提取三种土壤胶体,参照相关文献方法<sup>[12]</sup>,用Zeta电位仪测定其在不同环境条件下的Zeta电位。

### 1.3 数据处理

采用SPSS 16.0分析软件进行单因素方差均值多重比较数据分析, $P<0.05$ 表示显著差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 离子强度变化对土壤胶体释放的影响

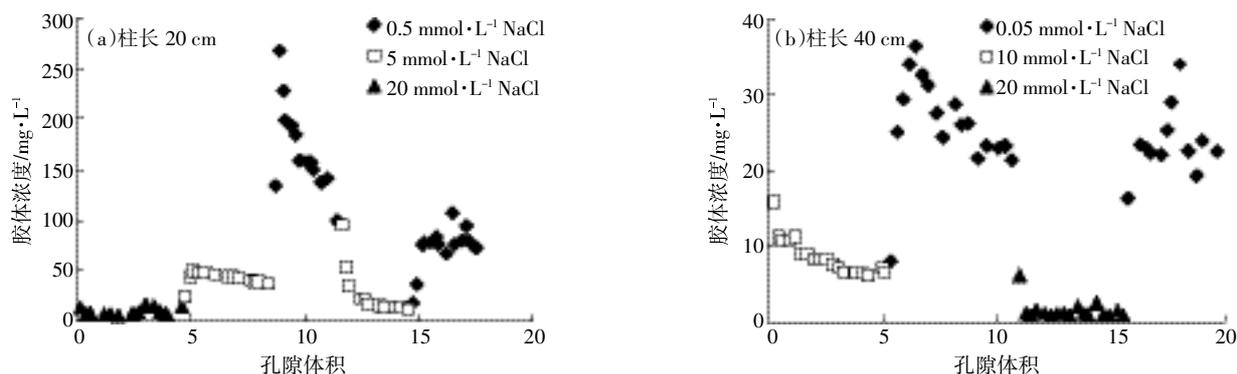
#### 2.1.1 离子强度变化对常熟乌栅土原状土柱土壤胶体释放的影响

离子强度变化对常熟乌栅土原状土柱土壤胶体

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of tested soils

土壤类型	pH	砂/%	粉粒/%	粘粒/%	总有机质/g·kg <sup>-1</sup>	矿物组成
常熟乌栅土	4.24	7.42	76.06	16.52	46.00	石英、钠长石、微斜长石、伊利石和绿泥石
东北黑土	6.38	5.96	84.20	9.84	55.40	石英、钠长石和微斜长石
江西红壤	6.36	24.63	64.31	11.06	4.30	石英、伊利石和绿泥石



(a)柱长 20 cm, 流速  $75 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $\text{pH}=7$ , 离子强度依次为:  $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ ;  
 (b)柱长 40 cm, 流速  $180 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $\text{pH}=7$ , 离子强度依次为:  $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 0.05 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 0.05 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$

图 1 离子强度变化对常熟乌栅土原状土柱胶体释放影响

Figure 1 Effects of ionic strength on colloid release in undisturbed Wushan soil columns from Changshu

释放的影响如图 1 所示。野外条件下, 由于降水强度常有不同, 并且不同深度的土层, 其基本性质也有差异, 本实验研究了不同降水强度下, 离子强度变化对不同长度土柱胶体释放的影响。由图 1 可知, 淋洗液电解质为 NaCl 时, 离子强度变化对不同柱长及流速的原状常熟土柱胶体释放规律影响一致, 即离子强度降低显著促进胶体释放, 离子强度增加显著抑制胶体释放。以 20 cm 常熟原状土柱为例, 当离子强度为  $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$  时, 土壤释放胶体浓度很低, 最大仅为  $14.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 离子强度从  $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  降至  $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 渗滤液中胶体浓度快速增加, 达  $48.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 之后缓慢下降; 离子强度继续降至  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 胶体浓度快速升至  $226.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 之后开始下降, 但仍达  $100.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 离子强度从  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  又升至  $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 胶体浓度迅速下降至  $12.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 然后基本维持稳定; 离子强度从  $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  降至  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 胶体浓度又快速升至  $83.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。用 SPSS 16.0 分析结果显示所有  $P$  值均小于 0.05, 表示胶体释放浓度差异显著。上述变化规律的主要原因可能是淋洗液离子强度降低, 导致土壤胶体的双电子层厚度增加, 胶体颗粒之间的静电斥力增大, 胶体的附着力减小, 大量胶体可从土壤基质中快速活化分离并随土壤溶液迁移<sup>[13]</sup>, 且分离下的胶体稳定性好, 移动性强<sup>[14]</sup>, 土壤溶液中胶体浓度因此而剧增; 相反, 淋滤液离子强度变大时, 胶体表面的双电子层厚度被压缩, 胶体颗粒之间的静电斥力减小, 范德华引力增强, 土壤胶体趋于聚合, 导致土壤溶液中胶体浓度急剧下降。不同离子强度下的常熟土壤胶体的 Zeta 电位变化也进一步验证了此观点(表 2)。当淋洗液离子强度从  $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$  降为  $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$  和  $0.5$

表 2 不同水化学条件下常熟乌栅土胶体悬浮液的 Zeta 电位  
 Table 2 Zeta potentials of Changshu Wushan soil colloidal suspensions under different water chemical conditions

电解质类型	pH	离子强度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	Zeta 电位/ $\text{mV}$
NaCl	7	0.05	-34.31
		0.5	-32.86
		5	-27.18
		10	-26.34
		20	-24.45
CaCl <sub>2</sub>	7	0.15	-15.35
		1	-14.14
		10	-13.63
		100	-9.03
NaCl	4	1	-28.87
	5	1	-30.02
	7	1	-29.62
	9	1	-29.70
	11	1	-30.05
	11	1	-15.08
CaCl <sub>2</sub>	5	1	-14.32
	7	1	-14.54
	9	1	-14.80

$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$  时, 土壤胶体溶液 Zeta 电位从  $-24.45 \text{ mV}$  依次增至  $-27.18 \text{ mV}$  和  $-32.86 \text{ mV}$ , 根据 DLVO 理论, 此时胶体双电层的静电斥力位能逐渐增加, 胶体趋于稳定<sup>[15]</sup>。Bradford 与 Kim<sup>[13]</sup>研究离子强度对胶体在多孔介质中释放的作用时, 也发现淋滤液离子强度降低促进胶体释放, 离子强度增加抑制胶体释放。Grolimund 和 Borkovec<sup>[6]</sup>不仅发现淋滤液单价钠离子浓度降低显著促进胶体从自然多孔介质中释放, 更进一步证实了在有利于胶体释放的条件下, 释放的胶体

粒子稳定性好,沉积速率非常低。孙慧敏等<sup>[16]</sup>研究离子强度对蒙脱石胶体在饱和多孔介质中运移与释放的影响时,同样发现溶液离子强度增加,胶体在多孔介质中的沉积量增大,溶液离子强度降低,促进沉积在多孔介质中的胶体的释放。

尽管离子强度变化对不同柱长的常熟乌栅土原状土柱胶体释放规律的影响一致,但40 cm土柱中胶体的释放量明显低于20 cm的土柱。产生该差异的原因可能是:其一,不同深度土的基本性质有所差异。对于常熟乌栅土,吴华山等<sup>[17]</sup>报道随着土层深度增加,土壤孔隙度、团聚度和有机质含量逐渐降低。28~42 cm深度土的孔隙度、团聚度和有机质含量明显低于0~15 cm土层。因此,胶体在0~40 cm土柱中的释放和运移能力可能低于0~20 cm的土柱。其二,离子强度变化的差异不同。20 cm土柱中,淋洗液离子强度变化为20 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl→5 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl→0.5 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl,而40 cm土柱中,淋洗液离子强度变化为10 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl→0.05 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl→20 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl,离子强度变化的差异可能导致胶体的释放量有所不同。

因此,在实际环境中,若土壤环境由于外来污染水介入等原因而具有了较高的离子强度,之后再经降水冲刷使得土壤水中离子强度降低,此时土壤中的胶体物质有可能产生增量释放,进而可能影响地下环境中污染物的迁移。

### 2.1.2 离子强度变化对不同土壤类型扰动土柱胶体释放的影响

不同离子强度下的常熟乌栅土、东北黑土和江西红壤胶体的Zeta电位见表2~表4。当淋洗液电解质为NaCl时,东北黑土与常熟乌栅土原状土柱结果类似,即土壤胶体的Zeta电位随离子强度的增加而减小,离子强度降低时显著促进胶体释放,离子强度增加抑制胶体释放( $P<0.05$ )。其原因也与常熟原状乌栅土土柱类似。而对于江西红壤,无论NaCl浓度如何变化,均不对土壤胶体释放产生影响( $P>0.05$ )。其原因可能是土壤的性质不同。除了水化学因素,土壤胶体的释放还受有机质含量、粘粒含量、矿物组成及土壤孔隙结构等因素的综合影响<sup>[18]</sup>。土壤中的有机质具有分散作用,有机质含量越高,有机胶体含量越多,胶体的可移动性越大,胶体越稳定<sup>[14]</sup>。土壤渗透性越强,水分下渗速率越快,对流经土壤的侵蚀作用越强烈,土壤胶体释放量越大<sup>[19]</sup>。土壤渗透性受粘粒含量及矿物

表3 不同水化学条件下东北黑土胶体悬浮液的Zeta电位  
Table 3 Zeta potentials of Dongbei black soil colloidal suspensions under different water chemical conditions

电解质类型	pH	离子强度/mmol·L <sup>-1</sup>	Zeta 电位/mV
NaCl	7	0.5	-32.66
	7	5	-29.38
	7	15	-24.92
	7	20	-21.25
CaCl <sub>2</sub>	7	0.15	-16.74
	7	1	-15.09
	7	10	-12.84
NaCl	7	100	-7.61
	5	1	-27.48
	7	1	-27.94
	9	1	-29.09
CaCl <sub>2</sub>	11	1	-30.85
	5	1	-14.96
	7	1	-15.68
	9	1	-16.31
	11	1	-16.52

表4 不同水化学条件下江西红壤胶体悬浮液的Zeta电位  
Table 4 Zeta potentials of Jiangxi red soil colloidal suspensions under different water chemical conditions

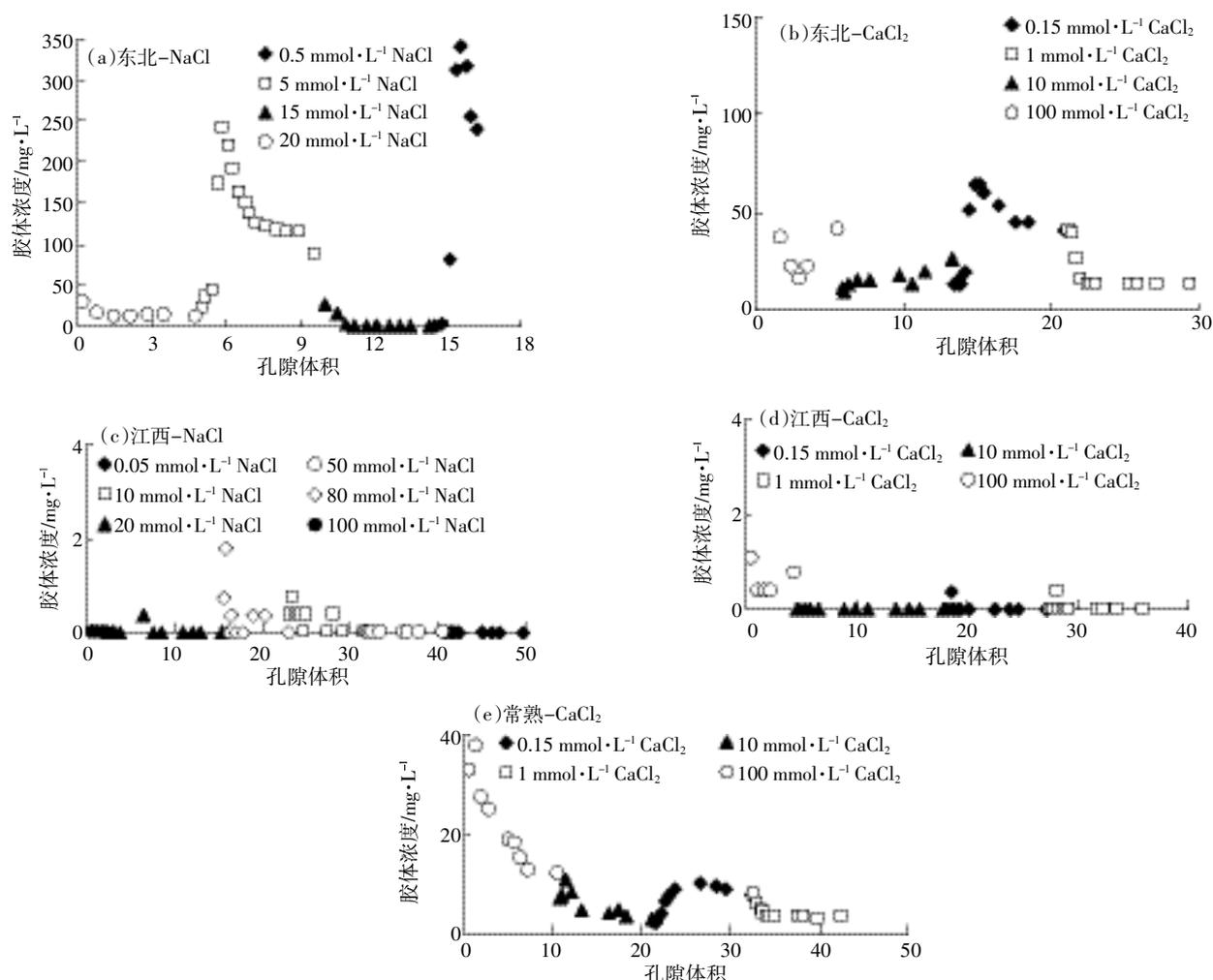
电解质类型	pH	离子强度/mmol·L <sup>-1</sup>	Zeta 电位/mV
NaCl	7	0.05	-22.72
	7	10	-19.32
	7	20	-17.47
	7	50	-15.88
	7	80	-13.32
	7	100	-8.03
CaCl <sub>2</sub>	7	0.15	-11.46
	7	1	-10.45
	7	10	-9.40
NaCl	7	100	-3.01
	5	1	-17.94
	7	1	-18.75
	9	1	-19.26
CaCl <sub>2</sub>	11	1	-19.47
	5	1	-9.92
	7	1	-10.52
	9	1	-11.02
	11	1	-12.35

组成等的影响,水敏性矿物(伊利石,蒙脱石等)吸水膨胀后分解为更细的粘土微粒,随水流流动时堵塞在土壤的孔隙中,导致土壤的渗透性降低。粘粒及水敏性矿物含量越多,土壤渗透性越差<sup>[19]</sup>。Kjaergaard等<sup>[20]</sup>研

究也发现,土壤胶体的活化与释放随着土壤粘粒含量的增加而降低。本实验的三种土中,东北黑土的有机质含量最多为  $55.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1),土壤中可移动且稳定的胶体量最大;粘粒含量最少(9.84%),且不含水敏性矿物,土壤渗透性大,孔隙度也最大,因此离子强度降低时东北黑土胶体的释放量最大。江西红壤有机质含量仅为  $4.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤中可移动且稳定的胶体量最小,粘粒含量为 11.06%,又含有水敏性矿物,土壤渗透性小,孔隙度相对较小,因而江西红壤胶体的释放量最小且离子强度降低时释放量也不产生变化。常熟乌栅土孔隙度居中,虽然粘粒含量最高(16.52%)且含有水敏性矿物,但有机质含量高( $46.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),土壤中可移动且稳定的胶体量较大。因此,离子强度降

低时常熟乌栅土胶体的释放量大于江西红壤而小于东北黑土,当然其机理还有待于进一步研究验证。与本研究结果类似,商书波<sup>[9]</sup>在探讨降雨对土壤胶体释放与迁移的影响研究中也发现土壤矿物组成和机械组成不同,胶体的释放量不同,土壤质地直接对土壤渗透性及胶体的释放量产生影响。

无论东北黑土,江西红壤或常熟乌栅土,当淋滤液电解质为  $\text{CaCl}_2$  时,离子强度变化对土壤胶体的释放均不产生明显影响( $P>0.05$ ),且胶体释放量远低于电解质为  $\text{NaCl}$  时(图 2),原因可能是电解质的临界聚沉浓度(Critical coagulation concentration, CCC)不同。与胶体表面电荷相反的离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ )称为异电离子,电解质的 CCC 与异电离子价数的六次方近似



柱长 15 cm, 流速  $30 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ , pH=7, 离子强度依次为: (a)  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ ,

(b)  $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \rightarrow 10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \rightarrow 0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \rightarrow 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ ,

(c)  $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 80 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl} \rightarrow 0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ ,

(d)  $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \rightarrow 10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \rightarrow 0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \rightarrow 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ , (e)  $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \rightarrow 10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \rightarrow 0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \rightarrow 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$

图 2 离子强度变化对不同土壤类型扰动土柱胶体释放影响

Figure 2 Effects of ionic strength on colloid release in disturbed columns of different soils

成反比<sup>[15]</sup>,因此CaCl<sub>2</sub>的CCC远小于NaCl,即CaCl<sub>2</sub>对土壤胶体的絮凝能力远大于NaCl。当电解质为CaCl<sub>2</sub>时,胶体易于絮凝,离子强度变化时,胶体释放量远小于电解质为NaCl时<sup>[21-23]</sup>。Grolimund等<sup>[21]</sup>在研究一价和二价阳离子浓度变化对天然多孔介质中胶体释放的影响时,也发现二价阳离子浓度降低不促进土壤胶体释放量的增加。Baalousha等<sup>[22]</sup>发现,由于Ca<sup>2+</sup>的CCC小,当电解质为CaCl<sub>2</sub>时,银纳米颗粒的穿透率小于电解质为NaCl时。

尽管外来因素如离子强度降低能导致土壤环境中胶体释放量增加,但在实际环境中,由于我国地域分布较广,土壤性质差异较大,对不同性质的土壤产生的影响程度可能会有所不同。其次,对于不同价态的阳离子导致的离子强度变化,对土壤环境中胶体释放量的影响程度也不同。因此,在实际环境中,需要综合多种因素考虑离子强度的变化对土壤中胶体物质释放量的影响。

## 2.2 pH变化对土壤胶体释放的影响

### 2.2.1 pH变化对常熟乌栅土原状土柱土壤胶体释放的影响

pH变化对常熟乌栅土原状土柱土壤胶体释放的影响如图3所示。总体而言,与离子强度相比,pH变化对土壤胶体的释放影响较小,pH变化范围为4~11时,土壤胶体的释放量没有显著变化( $P>0.05$ )。Bunn等<sup>[24]</sup>在研究pH对沉积物中胶体活化的影响时,发现pH增加促进天然胶体从沉积物中释放。相反,吕俊佳等<sup>[25]</sup>在研究不同环境因子对黑土胶体在饱和和多孔介质中运移特性的影响时,发现pH变化范围为4~9时,胶体的穿透曲线没有显著差异,胶体悬浮液的

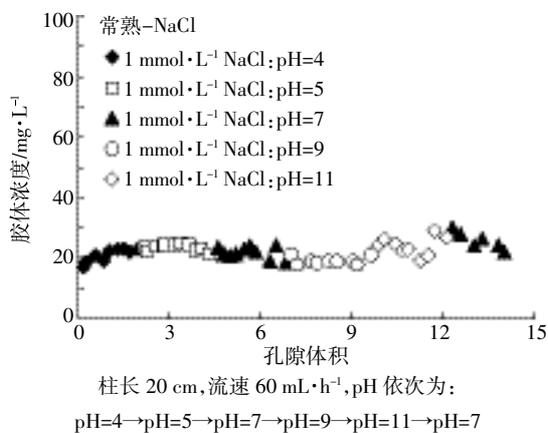


图3 pH变化对常熟乌栅土原状土柱胶体释放影响

Figure 3 Effects of pH on colloid release in undisturbed Wushan soil columns from Changshu

Zeta 电位变化较小,溶液pH对黑土胶体在多孔介质中的运移沉积过程影响不大。Morales等<sup>[26]</sup>研究了人工合成胶体在不同pH条件下的运移规律,结果也表明在该试验pH范围内,Zeta电位变化幅度小,土壤胶体与砂表面间的作用力没有明显差异。本研究中,pH变化对胶体释放未见显著影响,其原因可能与上述类似,试验pH范围4~11内,土壤胶体表面Zeta电位变化较小(表2),所带电荷变化不大,胶体颗粒和土壤表面间的排斥力因而没有明显变化,导致胶体释放也未见明显改变。

### 2.2.2 pH变化对不同土壤类型扰动土柱胶体释放的影响

pH变化对不同土壤类型扰动土柱土壤胶体释放的影响如图4所示,与常熟乌栅原状土柱结果类似。总体而言,pH对扰动土柱土壤胶体释放的影响也很小( $P>0.05$ ),pH变化范围为5~11时,土壤胶体浓度变化幅度不大,其原因可能与试验pH范围、土壤胶体表面Zeta电位变化较小有关(表2、表3与表4)。与离子强度变化时土壤类型及电解质体系对胶体的影响一致,pH变化时东北黑土的胶体释放量大于江西红壤,原因可能也是两种土壤的基本理化性质有差异<sup>[21]</sup>。当电解质为NaCl时,pH变化导致土壤胶体的释放量略大于电解质为CaCl<sub>2</sub>,可能是由于Ca<sup>2+</sup>的桥键作用,Ca<sup>2+</sup>对土壤胶体絮凝能力大于Na<sup>+</sup><sup>[15]</sup>。

因此,对于本实验范围内的土壤,由于外来污染介入等原因而造成的土壤水的pH变化,可能对土壤中胶体物质释放的影响较小。

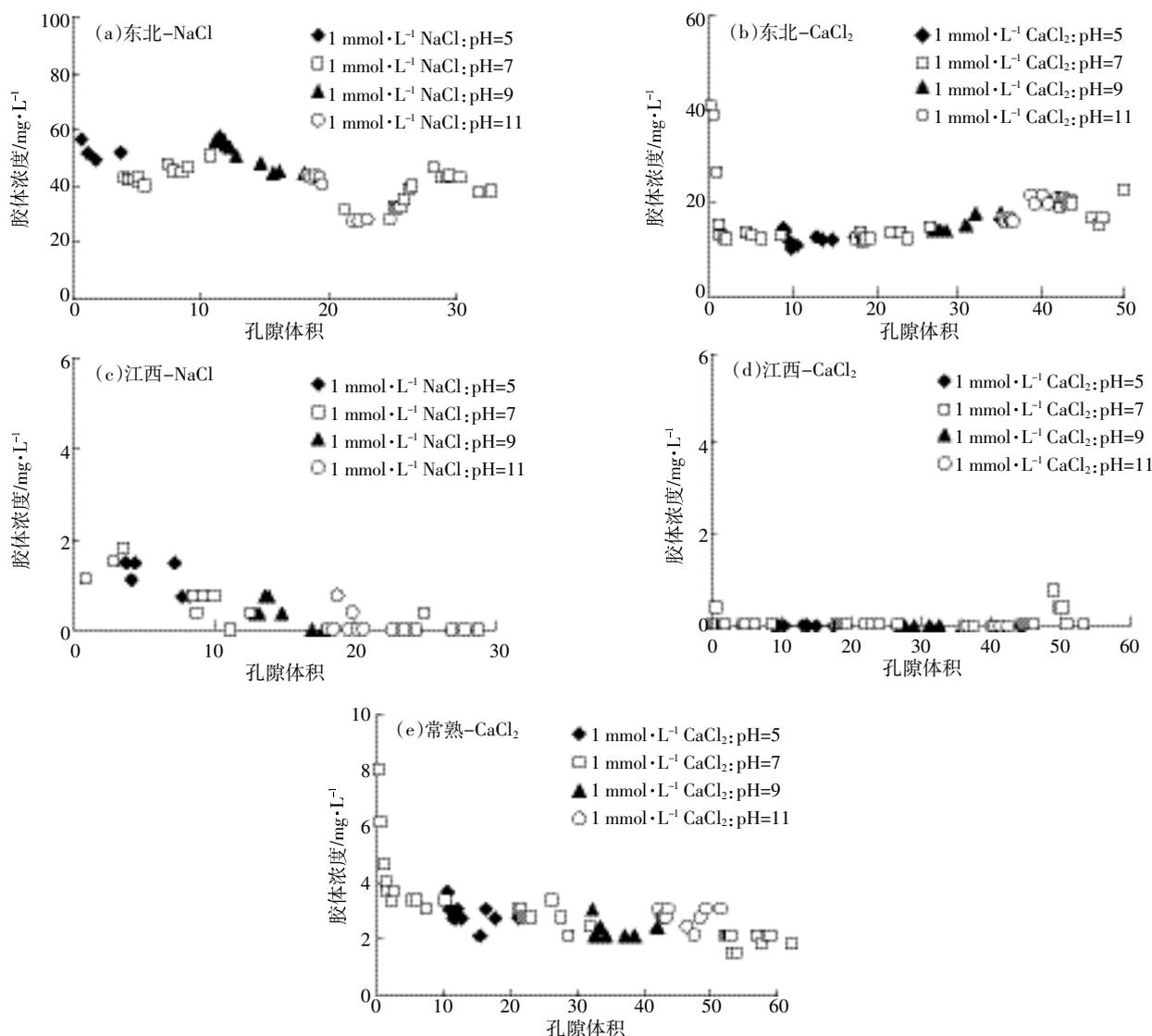
## 3 结论

(1)离子强度变化对我国不同类型土壤胶体释放影响不同。淋洗液电解质为NaCl时,对常熟乌栅土及东北黑土,离子强度降低显著促进胶体释放,离子强度增加抑制胶体释放;而对江西红壤,离子强度变化不影响胶体释放。淋洗液电解质为CaCl<sub>2</sub>时,离子强度变化均对三种土壤胶体的释放不产生明显影响。无论淋洗液电解质为NaCl或CaCl<sub>2</sub>,江西红壤的胶体释放量远低于东北黑土和常熟乌栅土。

(2)试验范围内,pH变化对三种土壤胶体的释放量均无显著影响。

### 参考文献:

- [1] Grolimund 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



柱长 15 cm, 流速  $30 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ , pH 依次为: (a) pH=5→pH=7→pH=9→pH=11→pH=7, (b) pH=7→pH=5→pH=7→pH=9→pH=11→pH=7, (c) pH=7→pH=5→pH=7→pH=9→pH=11→pH=7, (d) pH=7→pH=5→pH=7→pH=9→pH=11→pH=7, (e) pH=7→pH=5→pH=7→pH=9→pH=11→pH=7

图4 pH变化对不同土壤类型扰动土柱胶体释放影响

Figure 4 Effects of pH on colloid release in disturbed columns of different soils

(10): 3118–3123.

- [2] Roy S B, Dzombak D A. Chemical factors influencing colloid-facilitated transport of contaminants in porous media[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31(3): 656–664.
- [3] Ryan J N, Elimelech M. Colloid mobilization and transport in groundwater[J]. *Colloids and Surfaces A*, 1996, 107(20): 1–56.
- [4] Kretzschmar R, Borkovec M, Grolimund D, et al. Mobile subsurface colloids and their role in contaminant transport[J]. *Advance in Agronomy*, 1999, 66: 121–193.
- [5] Grolimund D. Colloid-facilitated transport of strongly sorbing contaminants in natural porous media; Mathematical modeling and laboratory column experiments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(17): 6378–6386.
- [6] Grolimund D, Borkovec M. Release of colloidal particles in natural

porous media by monovalent and divalent cations[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, 87(3–4): 155–175.

- [7] 胡俊栋, 沈亚婷, 王学军. 土壤胶体在不同饱和度土壤介质中的释放与淋溶行为研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(9): 1829–1836.
- HU Jun-dong, SHEN Ya-ting, WANG Xue-jun. Release and mobilization of soil colloid in the natural soil packed column with various water saturations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1829–1836.
- [8] 胡俊栋, 沈亚婷, 王学军. 离子强度、pH对土壤胶体释放、分配沉积行为的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 629–637.
- HU Jun-dong, SHEN Ya-ting, WANG Xue-jun. The effect of ionic strength and pH conditions on the release, deposition and dispersibility behaviors of natural soil colloid[J]. *Ecology and Environmental*, 2009, 18(2): 629–637.

- [9] Rousseau M, Di Pietro L, Angulo-Jaramillo R, et al. Preferential transport of soil colloidal particles; Physicochemical effects on particle mobilization[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(1):247-261.
- [10] Fan Z S, Casey F X M, Larsen G L, et al. Fate and transport of 1278-TCDD, 1378-TCDD, and 1478-TCDD in soil-water systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 371(1-3):323-333.
- [11] El-Farhan Y H, Denovio N M, Herman J S, et al. Mobilization and transport of soil particles during infiltration experiments in an agriculture field, Shenandoah Valley, Virginia[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(17):3555-3559.
- [12] 徐仁扣,肖双成. 氧化铁的存在方式对土壤和黏土矿物胶体电动电位的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5):945-947.  
XU Ren-kou, XIAO Shuang-cheng. Effect of the existing type of iron oxides on zeta potential of a soil and minerals[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5):945-947.
- [13] Bradford S A, Kim H. Implications of cation exchange on clay release and colloid-facilitated transport in porous media[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(6):2040-2046.
- [14] 商书波,王丰雨,李绪谦. 土壤胶体理化性质对其稳定性和可移动性的影响研究[J]. 土壤, 2010, 42(6):1015-1019.  
SHANG Shu-bo, WANG Feng-yu, LI Xu-qian. Study on stability and mobility of soil colloids based on physicochemical property[J]. *Soils*, 2010, 42(6):1015-1019.
- [15] 张玉亭,吕彤. 胶体与界面化学[M]. 北京:中国纺织出版社, 2008.  
ZHANG Yu-ting, LÜ Tong. Colloid and interface chemistry[M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2008.
- [16] 孙慧敏,殷宪强,曹秀蓉. 离子强度对蒙脱石胶体在饱和多孔介质中运移与释放的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(5):1120-1125.  
SUN Hui-min, YIN Xian-qiang, CAO Xiu-rong. The effect of solution ionic strength on the transport and release of montmorillonite colloid in saturated porous media[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5):1120-1125.
- [17] 吴华山,陈效民,叶民标,等. 太湖地区主要水稻土水力特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):181-183,187.  
WU Hua-shan, CHEN Xiao-min, YE Min-biao, et al. Moisture characteristics and their effect factors of main paddy soils in Tai Lake Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):181-183, 187.
- [18] de Jonge L W, Kjaergaard C, Moldrup P. Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils; An introduction[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(2):321-325.
- [19] 商书波. 降雨对土壤胶体释放与迁移的影响研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6):199-202.  
SHANG Shu-bo. Study on the release and migration of soil colloids with rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6):199-202.
- [20] Kjaergaard C, Moldrup P, de Jonge L W, et al. Colloid mobilization and transport in undisturbed soil columns; II. The role of colloid dispersibility and preferential flow[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(2):424-433.
- [21] Grolmund D, Borkovec M. Release of colloidal particles in natural porous media by monovalent and divalent cations[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, 87(3-4):155-175.
- [22] Baalousha M, Nur Y, Romer I, et al. Effect of monovalent and divalent cations, anions and fulvic acid on aggregation of citrate-coated silver nanoparticles[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 454-455(1):119-131.
- [23] Akaighe N, Depner S W, Banerjee S, et al. The effects of monovalent and divalent cations on the stability of silver nanoparticles formed from direct reduction of silver ions by Suwannee River humic acid/natural organic matter[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 441(15):277-289.
- [24] Bunn R A, Magelky R D, Ryan J N, et al. Mobilization of natural colloids from an iron oxide-coated sand aquifer; Effect of pH and ionic strength[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(3):314-322.
- [25] 吕俊佳,许端平,李发生. 不同环境因子对黑土胶体在饱和多孔介质中运移特性的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(8):875-881.  
LÜ Jun-jia, XU Duan-ping, LI Fa-sheng. Effects of different environmental factors on the transportation of black soil colloid in saturated porous media[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(8):875-881.
- [26] Morales V L, Zhang W, Gao B, et al. Impact of dissolved organic matter on colloid transport in the vadose zone; deterministic approximation of transport deposition coefficients from polymeric coating characteristics [J]. *Water Research*, 2011, 45(4):1691-1701.