应 用 生 态 学 报 2019 年 1 月 第 30 卷 第 1 期 Chinese Journal of Applied Ecology，Jan． 2019，30( 1) : 10－20

土壤氟形态与氟污染土壤修复

袁立竹 ， 王加宁 马春阳 郭书海 ，

( 1 山东省科学院生态研究所，济南 250013; 2 中国科学院沈阳应用生态研究所，沈阳 110016; 3 扎鲁特旗环境监测站，内蒙古 通辽 029100)

摘 要 我国土壤氟污染问题严峻，给部分地区人体健康和生态安全造成严重威胁，但土壤 氟污染与防治问题仍没有受到人们的广泛关注．本文概述了土壤中氟的存在形态以及发生的 主要化学反应，综述了近年来国内外有关氟污染土壤修复的研究进展，提出了今后氟污染土 壤修复的研究方向，以期为氟污染土壤的修复提供借鉴和参考．土壤中氟主要分为5 种形态， 其中 90%以上以残渣态存在，土壤溶液中的氟主要发生沉淀-溶解、络合-解离和吸附-解吸等 反应来维持水-土系统中的氟平衡．目前，氟污染土壤修复技术研究主要集中在化学固定修复 技术、化学淋洗技术、电动修复技术以及植物修复技术．今后需要重点研究氟在土壤中的赋存 形态及其影响因子，筛选功能微生物和植物，开发联合修复技术以修复氟污染土壤． 关键词 土壤; 氟; 赋存形态; 修复技术

Fluorine speciation in soil and the remediation of fluorine contaminated soil． YUAN Li-zhu1，2 ， WANG Jia-ning1，MA Chun-yang3 ，GUO Shu-hai1 2\* ( 1 Institute of Ecology，Shandong Academy of Sciences，Jinan 250013，China; 2 Institute of Applied Ecology，Chinese Academy of Sciences，Shen- yang 110016，China; 3 Jarud Banner Environmental Monitoring Station，Tongliao 029100，Inner Mongolia，China ) ．

Abstract: In China，fluoride pollution in soil is severe and poses a serious threat to human health and ecological security． However，how to control fluorine-contaminated soil has not received wide­spread attention． Here，we summarized fluorine speciation in soil and its main chemical reactions in water-soil system and reviewed the research progress on the remediation of fluorine-contaminated soils． Then，we proposed the focus of future research on fluorine-contaminated soil remediation． The aim of this review was providing the reference for the remediation of fluoride-contaminated soil． There are five forms of fluorine in soils，with the proportion of residual fluorine being over 90% ． The reactions of fluorine in the soil solution mainly include precipitation-dissolution，complexation-disso- ciation，and adsorption-desorption． At present，the remediation technology of fluorine contaminated soil mainly focused on chemo-immobilization，chemical leaching ，electrokinetic remediation，and phytoremediation． Clarifying the combined forms of fluorine in soil，screening functional microorga­nisms and plants，developing the combined remediation technology will be the focus of future research． Ultimately ，on site fluorine-contaminated soil remediation could be implemented．

Key words: soil; fluoride; speciation; remediation technology．

氟是人体必需的微量元素，摄入适量的氟有助 于牙 齿 的 发 育; 但摄入过量的氟则会造成氟中 毒［1－2］，对植物和动物造成毒害作用［3－4］．电解铝、燃 煤、钢铁加工和磷肥生产过程中会产生大量含氟废

本文由中国科学院重点部署项目( KFZD-SW-311 ) 资助 This work was supported by the Key Deployment P roject Chinese Academy of Sciences ( KFZD-SW-311) ．

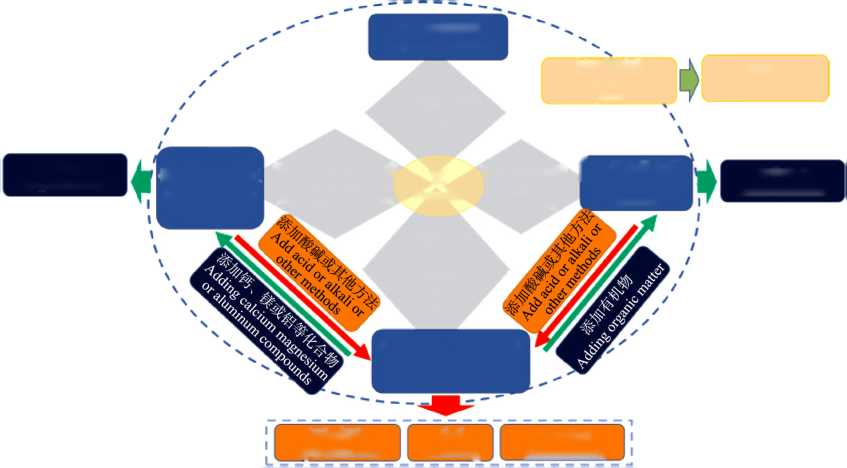
2018-10-12 Received, 2018-11—09 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author． E-mail: shuhaiguo@ iae．ac．cn 物进入环境，并可能通过各种途径进入人体，亚洲、 欧洲、美洲、非洲和澳洲等多地均曾发生地方性氟中 毒流行病.中国是地方性氟中毒重度流行的国家之 一，病例数约占世界病例总数的 60%［5］. 2014 年我 国卫生和计划生育事业发展统计公报显示，我国地 方性氟中毒病区县数共1219 个，氟斑牙患者 3268.2 万人，氟骨症病人 315.3 万人［6］. 饮用水和食物是人 体摄入氟的主要来源，通常，地下水、饮用水和食物中的氟均来自土壤［7］．土壤氟安全对生态环境健康 和人体健康具有重要意义．因此，对氟污染土壤的修 复已成为一个急需解决的环境问题．

土壤中氟的存在量、存在形态及生物有效性决 定其对生物和环境的危害程度，土壤水溶性氟含量 是土壤-水-植物、动物（ 食物链） 氟环境风险的枢纽， 也是控制和治理氟污染的重要因素［8］．客土、深埋等 常规土壤修复方法可用于氟污染土壤修复［9］，化学 钝化技术、化学淋洗技术、电动修复技术以及植物修 复技术也可用于氟污染土壤治理．本文首先对土壤 氟的存在形态进行分析，并介绍国内外近年来氟污 染土壤修复技术的研究现状，并对氟污染土壤修复 的发展趋势和研究重点进行展望，为今后开展相关 研究提供借鉴和参考．

1. 土壤氟形态

土壤中氟的存在形态极为复杂［10］．一般可将土 壤中的氟分为: 水溶态、可交换态、铁锰氧化物态、有 机束缚态和残余固定态等（ 图 1） ． 大量调查研究表 明，土壤氟主要以残渣态为主，占全氟含量 90% 以 上，在不同地区各形态氟含量占比不同［11－12］．其中， 水溶态氟和可交换态氟对植物、动物、微生物及人类 有较高的有效性，易被作物根系吸收并进入食物 链［13－14］．土壤水溶态氟含量与土壤有机质、成土母 质、土壤 质 地、土壤 pH 值及气候条件等密切相 关^16，其中，土壤pH值对氟的存在形式具有显著 影响C7-18 .有研究表明，土壤pH为6.0-6.5时，氟 的溶解性最小,pH小于6或pH大于6.5时,土壤中 可溶态氟的含量会增加［19］．目前，对铁锰氧化物态 和有机束缚态氟的研究较少，有研究认为，铁锰结合 态氟与pH值、交换性钙和全磷呈显著正相关，与无 定形Al和游离Al呈显著负相关；有机结合态氟与 交换性钙和全磷呈显著正相关［20］.然而，由于不同 土壤性质不同，影响铁锰氧化物态和有机束缚态氟 含量的因素也会存在差异.

在水-土系统中，氟离子主要发生沉淀-溶解、络 合-解离、吸附-解析等反应来维持系统氟平衡（ 图2、 表1） .存在于土壤溶液中的氟离子会与土壤中的 Ca2+、Fe3+、Al3+、Mg2+等离子发生反应，形成沉淀，在 土壤中积累，但是这些反应过程是可逆的，一旦土壤 条件发生变化，它就会溶解出来，重新转化为氟离 子021 .在pH小于6的土壤条件下，土壤溶液中容易 形成 Al-F 络合物（AIF3、AIF4-、AlF2+、AlF2+），只有 极少部分的氟以自由氟离子的形式存在；在极酸性 土壤中，土壤溶液中存在大量游离态铁离子，因此可 溶性氟主要以 Fe-F 络合物（ FeF2+、FeF2+、FeF3） 的 形式存在022 ，此外，可溶性氟还可与锰、锌等离子形 成络合物.动、植物组织天然降解产生氨基酸、羧酸、 碳水化合物、低级醇和酚类物质等低分子有机配位 体，可与金属氟络合物形成复杂的络合物，这对中间 络合产物具有稳定作用.吸附是土壤积累氟的一种 重要方式，土壤中铁铝氧化物胶体和土壤腐殖质是

铁猛氧化物态氟

Iron manganese oxide fluorine

土壤溶液或 静电吸附

Soil solution or electrostatic adsorption

氟

Fluorine

铁、猛和铝的化合物 Iron, manganese and aluminum compounds

水溶态氟、可交换态氟 Water soluble fluorine Exchangeable fluorine

电动修复

Electrokinetic

淋洗

Leaching

植物提取

Phytoextraction

植物阻隔

Phytoexclusion

化学钝化

Immobilization

化学钝化

Immobilization

残余固定态氟

Residual fluorine

Organic bound fluorine

低积累植物

Low accumulation plant

有机酸腐殖酸［弔■机束網态氟

Organic acid humic acid

矿质颗粒晶格

Mineral particle lattice

图 1 土壤氟赋存形态及土壤氟修复技术

Fig． 1 Speciation of fluorine in soil and soil fluorine remediation technology.

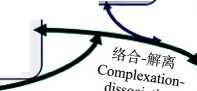
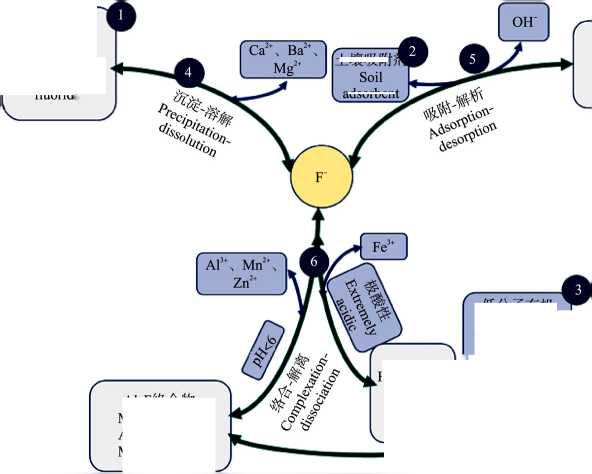
表 1 土壤中氟发生的主要化学反应

Table 1 Main chemical reactions of fluorine in soil

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 反应类型  Reaction type | 化学反应 Chemical reaction | LogK0  (25 *°C*) |
| ④沉淀-溶解 | CaF2( s) !Ca2++2F－ | －10.41 |
| Precipitation- | MgF2( s) !Mg2++2F－ | －8.01 |
| dissolution | AlF3( s) !Al3++3F－ | －17.61 |
|  | FeF3( s) !Fe3++3F－ | －19.32 |
|  | KF( s) !K++F－ | 5.07 |
|  | Na3AlF6( s) !3Na ++Al3++6F－ | －27.14 |
|  | ZnF2( s) !Zn2++2F－ | 0.40 |
| ⑤吸附-解析 | [H2O-Fe-OH]0+F－![H2O-Fe-F]0+OH－ | － |
| Adsorption- | [HO-Fe-OH]－+F－![HO-Fe-F]－+OH－ | － |
| desorption | [H2O-Fe-OH]0+F－![HO-Fe-F]0+H2O | － |
|  | [Fe-OH-Fe]0+F－![Fe-F]－1 /2+[Fe-OH]－1 /2 | － |
|  | －COOH+F－!－COF+OH－ | － |
|  | －CH2OH+F－!－CH2F+OH－ | － |
|  | －OH+F－!－F+OH－ | － |
| ⑥络合-解离 | Al3++F－!AlF2+ | 6.98 |
| Complexation- | Al3++2F－!AlF2+ | 12.60 |
| dissociation | Al3++3F－!AlF3 | 12.65 |
|  | Al3++4F－!AlF3－ | 19.03 |
|  | Al3++5F－!AlF32－ | 23.45 |
|  | Al3++6F－!AlF33－ | 26.61 |
|  | Fe3++F－!FeF2+ | 6.00 |
|  | Fe3++2F－!FeF2+ | 9.20 |
|  | Fe3++3F－!FeF3 | 11.70 |
|  | Fe2++2F－!FeF2 | 0.03 |
|  | Mn2++F－![MnF]+ | －0.45 |
|  | Zn2++F－![ZnF]+ | 0.27 |
|  | Zn2++2F －![ZnF2]0 | －1.93 |

氟的主要吸附剂，对氟离子的吸附主要是通过与黏 土矿物和土壤腐殖质上的氢氧根离子发生交换实现 吸附，对金属-氟络合物阳离子的吸附则主要通过与 黏土矿物或土壤腐殖质上的阳离子交换实现[13].在 pH 值较高的土壤环境中，吸附于黏粒、有机质颗粒 和水合氧化物的可交换正电荷上的氟阴离子与

OH「发生交换，更多的氟阴离子被释放出来，土壤对 氟离子的吸附减少，使土壤溶液中氟离子的浓度升 高[12].针对 pH 值的影响，日本学者提出了一个土壤 可溶性氟存在状态的假定图.该假设指出，在pH大 于5的土壤环境中，无定形铝与氟离子发生络合反 应生成氟铝络合离子，若存在大量的钙离子，大量活 动性氟将被钙离子牢固地固定下来，可使土壤中活 性强的水溶性氟含量降低2~3倍问.

1. 氟污染土壤修复 基于土壤中氟的赋存形态以及水-土系统中氟 发生的主要化学反应，开发出氟污染土壤修复技术 （ 图 1）.目前，氟污染土壤修复技术研究主要包括化 学固定修复技术、化学淋洗技术、电动修复技术和植 物修复技术（ 表 2） .

土壤吸附

adsorbent

[H2O-Fe-F]° [F-Fe-OH]\_ [Fe-F]-

-cof-ch2f

不溶性胶 体氟化物 Insoluble colloidal fluoride

Fe-F络合物 Fe-F complex

低分子有机 配位体

Low molecular j organic [igands.

Al-F络合物 MnF+ZnF+HF Al-F complex MnF+ZnF+HF

低分子有机配位 体-M-F络合物 Low molecular organic ligands-M-F complex

图 2 水 -土系统中氟的化学平衡

Fig．2 Chemical equilibrium of fluorine in water-soil system.

①不溶性胶体氟化物指 AlF3( s) 、FeF3 ( s) 、CaF2 ( s) 、MgF2 ( s) 、KF( s) 等 Insoluble colloidal fluoride refered to AlF3( s) ， FeF3 ( s) ， CaF2 ( s) ，

MgF?(s) , KF(s) , etc.；②土壤吸附剂指铁铝氧化物、黏土矿物和有机大分子吸附剂等 Soil adsorbent refered to iron-aluminum oxide, clay minerals and organic macromolecular adsorbents；③低分子有机配位体指动、植物组织的天然降解产物，如氨基酸、羧酸、碳水化合物、低级醇和酚类物质等 Low molecular organic ligands refered to natural degradation products of animal and plant tissues, such as amino acids, carboxylic acids, carbohydrates, lower alcohols and phenolic substances; M 代表金属离子 M represented a metal ion; ④⑤⑥处具体的反应见表 1 Reaction of ④⑤⑥ were shown in Table 1.

2. 1 化学钝化

| 表 2 氟污染土壤修复技术对比[23]  Table 2 Comparison of fluorine-contaminated soil remediation techniques[23] | | | |
| --- | --- | --- | --- |
| 修复技术  Remediation technology | 适用范围  Application range | 优点  Advantage | 缺点  Disadvantage |
| 化学钝化 | 农田/场地 | 修复效率高、成本低 | 氟仍存在于土壤中，环境改变可能存在再 |
| Immobilization | Cropland / Field | High efficiency and low cost | 次污染风险 Fluorine still exists in soil，and environmental change may lead to the risk of re-pollution |
| 化学淋洗 | 场地 | 修复效率高 | 修复成本高 |
| Chemical leaching | Field | High efficiency | High cost |
| 电动修复 | 场地 | 修复效率高、对低渗透的黏土和淤泥土有较 | 修复成本较高 |
| Electrokinetic remediation | Field | 好效果 High efficiency and good effect on low permeability clay and silt soil | High cost |
| 植物提取 | 农田 | 修复成本低、无二次污染 | 修复效率低 |
| Phytoextraction | Cropland | Low cost and no secondary pollution | Low efficiency |
| 植物阻隔 | 农田 | 修复成本低、无二次污染 | 氟仍存在于土壤中，环境改变可能存在再 |
| Phytoexclusion | Cropland | Low cost and no secondary pollution | 次污染风险 Fluorine still exists in soil，and |

environmental change may lead to the risk of repollution

化学钝化修复技术主要是利用化学、生物等措 施改变土壤中无机污染物的化学形态和赋存形态， 从而降低污染物的生物有效性和迁移性024 .钙对土 壤中氟的固定具有重要作用，国内外已有大量研究 报道（表3）.梁成华等025 通过室内培养和田间试验 研究磷石膏对土壤氟含量和土壤氟形态分布的影 响，结果表明，经过连续4 年施用磷石膏改良土壤 后，土壤水溶性氟含量随磷石膏施用量增加而降低. 研究者认为，影响土壤水溶性氟含量的主要因素可 能是土壤钙含量的增加和 pH 值的降低.崔俊学 等026 通过向珠三角典型氟污染酸性土壤中添加系 列钙化合物，研究其对土壤 pH 值和土壤氟有效性 的影响，结果表明，添加氧化钙可以显著改善土壤酸 化，但是土壤中有效态氟含量上升，而添加碳酸钙对 不同土壤表现出不同的效应，硝酸钙对减小有效态 氟含量效果显著，但是对土壤酸化没有改善.王凌霞 等027 采用不同的钙化合物来调控不同茶园土壤中 水溶性氟含量，结果发现，不同茶园添加不同的钙化 合物对土壤中水溶性氟的固化效果不同，分析发现， 出现不同的固化效果主要与钙化合物的酸碱性和茶 园土壤的酸碱性有关.可见，土壤 pH 条件对其固定 土壤氟的效率具有重要影响.

黄雷等028 以贵州省某磷肥厂周边的氟污染土 壤为研究对象，采用室温养护方法研究生石灰和钙 镁磷肥联用对土壤 pH 和水溶性氟含量的影响，研 究表明，氧化钙与钙镁磷肥联用比其单独添加有更 好的土壤水溶性氟的固化效果，分析发现，氧化钙和 钙镁磷肥联用可与土壤中的氟生成氟化钙、氟磷酸钙 等沉淀,影响土壤胶体有机基团等对氟的吸附能力．

表 3 稳定剂对土壤氟的稳定效果

Table 3 Effect of stabilizers on the stability of fluorine in soil

| 土壤类型  Soil type | 氟浓度  Fluorine content (mg • kg 1) | | 稳定剂  Stabilizer | 最佳浓度  Optimum concentration | 水溶性氟减小率  Reduction rate of water­soluble fluorine | 文献  Reference |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 总氟  Total | 水溶性氟  Water-soluble |
| 碱化草甸土  Alkaline meadow soil | 190.00 | 7.83 | 磷石膏 Phosphogypsum | 18000 kg ・ hm-2 | 12.9% | 025 |
| 潮土 | 596.65 | 6.44 | Ca(NO3 ) 2 | 5 mg • g-1 | 79.7% | 026 |
| Fluvo-aquic soil |  |  | CaO | - | 无效果 No effect |  |
|  |  |  | CaCO3 | 0.5 mg • g-1 | 56.1% |  |
| 水稻土 | 851.94 | 0.79 | Ca(NO3 ) 2 | 0.5 mg • g-1 | 84.8% |  |
| Paddy soil |  |  | CaO | - | 无效果 No effect |  |
|  |  |  | CaCO3 | 0.5 mg • g-1 | 72.2% |  |
| 氟污染土壤 | 1824.40 | 417.67 | 生石灰和钙镁磷肥（质量比3 : 1） | 1% | 86. 5% | 028 |
| Fluorine contaminated soil |  |  | Quick lime and fused calcium­magnesium phosphate ( mass ratio 3: 1) |  |  |  |
| 黄壤 Yellow soil | 1984.60 | 93.50 | 泥炭 Peat | 1.258 mg • g-1 | - | 029 |
| 红黄壤 | 316.04 | 2.78 | 木炭 Charcoal | 5.0% | 20.5% | 030 |
| Yellow-red soil |  |  | 竹炭 Bamboo charcoal | 5.0% | 26.6% |  |

除了钙化合物,有机物料也是固化土壤氟的有 效物质．王开勇等［29］通过向模拟高氟污染土壤中添 加有机物料泥炭和风化煤,研究两种有机物料对土 壤中水溶性氟含量的影响．结果表明,泥炭和风化煤 都能降低土壤中水溶性氟含量,且泥炭的处理效果 更好,同时表明,黄壤和石灰土环境下氟形态转化的 化学机理不同,运用有机质修复氟污染时黄壤适量 添加就可达到理想效果,而氟污染石灰土还存在其 他更直接有效的方法改变氟在石灰土环境下的形态 及活性.Gao等030研究了木炭和竹炭的添加对土壤 中氟形态的影响,结果表明,添加木炭和竹炭显著降 低了土壤中水溶态和可交换态氟含量,而铁锰氧化 物结合态氟含量显著增加,研究认为,木炭和竹炭是 一种有效的土壤氟稳定剂.张永利等031］研究了氮磷 钾肥对茶园土壤溶液中氟含量的影响,结果表明,施 用适量的酰胺态氮,或者配施磷或磷和钾,在一定时 间内可以提升土壤 pH 值,进而降低土壤溶液氟 含量.

2. 2 化学淋洗

土壤淋洗技术广泛应用于重金属和有机物等污 染土壤修复中032－33］,而在氟污染土壤修复中的应用 仍然较少.Xu等034研究了不同小分子有机酸对土 壤氟的解析能力,结果表明,苹果酸溶液显著提高了 土壤中氟的解析效率，并且随着溶液pH的降低，氟 的解析效率逐渐增加.李琼等035］研究了不同螯合剂 对氟污染土壤去除效率的影响，结果表明，随着提取 溶液浓度的增加，土壤氟的提取效果逐渐提高，其 中，半胱氨酸的萃取效果最佳，研究认为，半胱氨酸 除了有COOH-和NH2-基团，还有HS「基团，这是其 具有较高提取效果的重要原因.

Kim等036采用不同浓度氢氧化钠溶液作为提 取溶液，从土壤中提取氟，结果表明，随着氢氧化钠 浓度的增加，氟的提取效率逐渐增加，当氢氧化钠浓 度为1 mol • L-1时，氟的去除效率为22.8%.Moon 等037］研究了不同淋洗剂（ 盐酸、硝酸、氢氧化钠、硫 酸和酒石酸） 对氟污染土壤淋洗效果的影响，结果 表明，盐酸对氟污染土壤具有最好的淋洗效果，采 用3 mol • L-1的盐酸溶液可将初始浓度为740 mg • kg'1氟污染土壤中的氟去除达97%，处理后可 达到韩国居住区土壤预警标准值.

2. 3 电动修复技术

电动修复技术是一种高效的土壤修复技术，广 泛应用于重金属、有机物以及放射性元素污染的土 壤、污泥和沉积物的修复038'40］.电动修复技术是在 电场作用下氟离子通过电迁移和电渗流等从土壤中 去除的过程039］.研究表明，电动修复技术可有效应 用于修复氟污染土壤，目前已有大量试验研究并取 得了良好效果.Kim等036研究了通过循环强碱溶液 调控阳极pH的方法电动修复氟污染土壤，结果表 明，随着阳极电解液浓度和施加电流密度的增加，土 壤氟的去除率逐渐增加，经过14 d 的处理，土壤中 氟的去除率最高可达75.6%.研究认为，调控阳极电 解液条件电动修复氟污染土壤是一种有前景的修复 技术.Zhu等041和朱书法等042开展了相似的研究， 并获得了相似的研究结果.研究分别利用去离子水 和氢氧化钠作为电解液，采用循环电解液的方式电 动修复氟污染土壤，结果表明，采用氢氧化钠作为电 解液并使两极溶液串联循环时可高效从土壤中去除 氟.同时，朱书法等043 研究了不同电压梯度和氢氧 化钠浓度对电动修复氟污染土壤的影响，结果表明， 随着电压梯度和电解液浓度的增加，土壤中氟的去 除效率逐渐增加，最高去除效率可达73%.

Zhou等弘45研究了采用太阳能电池、离子交换 膜和脉冲电流对电动修复氟污染土壤的影响.研究 认为，利用太阳能作为电源电动修复氟污染土壤是 行之有效的方法，采用脉冲电动修复可有效提高氟 污染土壤的去除效率.随后,Zhou等阴研究了阴极 逼近对电动修复氟污染土壤的影响，研究表明，阴极 逼近电动修复氟污染土壤是一种有效的氟污染土壤 修复方法，采用该方法可提高电动修复效率，减小电 动修复能耗，缩短修复时间.同时,Zhou等047研究了 电动修复氟污染土壤时对土壤肥力的影响.Zhu 等06 采用氨水作为电解液，采用竹炭作为吸附剂联 合电动修复氟污染土壤.研究表明，其联合修复效率 最高可达 75.7%，氨水强化电动修复结合竹炭吸附 是一种去除氟污染土壤的有效方法.Zhu等阴研究 了不同电压梯度电动修复氟污染红壤的修复效率， 研究采用去离子水作为电解液，结果表明，随着电 压梯度的增加，氟的去除效率逐渐增加，在 1.5 V • cm'1的电压梯度下，氟的去除率达到63.2%.

2. 4 植物修复

氟污染土壤的植物修复可分为植物提取和植物 阻隔，植物提取即利用氟积累植物从土壤中吸取氟， 随后收割地上部并进行集中处理，连续种植该植物， 达到降低或去除土壤氟污染的目的049 .植物阻隔是 通过种植氟低积累品种来减少作物可食部位的氟含

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 量，从而达到安全利用污染农田的目的，该项技术被 称为植物阻隔修复050 .目前，氟污染土壤植物修复 的工作一方面集中在氟积累植物的筛选，并结合其 他修复技术，从土壤中高效富集氟，从而将氟彻底从  表 4 植物氟富集情况比较  Table 4 Characteristics of fluorine content in plants | | 土壤中去除.另一方面是筛选氟低积累植物，减小氟 从土壤向植物体的转移，或种植不进入食物链的植 物，减轻氟对人体的危害，部分植物氟富集特征列于 表 4. | | |
| 种类 | 地点 | 植物 | 氟含量 | 文献 |
| Type | Site | Plant | Fluorine content | Reference |
|  |  |  | （mg • kg-1） |  |
| 氟富集植物 | 浙江武义萤石矿附近 | 成熟茶叶 Ripe tea | 2231 | 051 |
| Fluorine accumulator | Near fluorite mine，Wuyi，Zhejiang | 茶叶新梢 Tea shoot | 796 |  |
| plant | 浙江武义 普通茶园 | 成熟茶叶 Ripe tea | 574 |  |
|  | Ordinary tea garden，Wuyi，Zhejiang | 茶叶新梢 Tea shoot | 167 |  |
| 牧草 | 天山草场 Tianshan pasture | 牧草 Grass | 0.50-9.40 | 052 |
| Pasture | 川西北草原 | 牧草 Grass | 3.14 （冷季 Cold season） | 053 |
|  | Northwest Sichuan grassland |  | 1.42 （ 暖季 Warm season） |  |
|  | 内蒙古沙德格地区 | 牧草 Grass | 92.01 | 054 |
|  | Shadege area，Inner Mongolia |  |  |  |
| 粮食作物 | 南京市大厂区 | 大米 Rice | 1.60 - 3.83 | 055 |
| Grain crop | Dachang District，Nanjing | 稻壳 Rice husk | 5.03-17.23 |  |
|  | 江苏某地氟病区 | 小麦 Wheat | 0.73 | 055 |
|  | An endemic fluorosis area | 面粉 Flour | 0.50 |  |
|  | in Jiangsu Province | 麦麸 Wheat bran | 0.84 |  |
|  |  | 玉米 Corn | 0.85 |  |
|  |  | 大米 Rice | 0.76 |  |
|  |  | 大豆 Soyabean | 0.70 |  |
|  | 松嫩平原西南部 | 玉米 Corn | 0.66 | 056 |
|  | Southwestern Songnen Plain | 高粱 Sorghum | 0.60 |  |

谷子 Foxtail millet 0.82

谷子（ 去壳） Foxtail millet （ shelled） 0. 74

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 大豆 Soyabean | | | 0.67 | |
|  | 西藏 | 青稞粉 Barley powder | 0.24 | 057 |
|  | Tibet | 面粉 Flour | 0.32 |  |
| 蔬菜 | 江苏某地氟病区 | 青菜 Greens | 12.25 | 055 |
| Vegetable | An endemic fluorosis area | 萝卜 Radish | 1.88 |  |
|  | in Jiangsu Province | 萝卜叶 Radish leaf | 8.51 |  |
|  |  | 白菜叶 Cabbage leaf | 7.43 |  |
|  |  | 茄子 Eggplant | 6.64 |  |
|  |  | 茄子叶 Eggplant leaf | 15.79 |  |
|  |  | 辣椒 Chili | 8.89 |  |
|  | 松嫩平原西南部 | 白菜 Cabbage | 1.45 | 056 |
|  | Southwestern Songnen Plain | 马铃薯 P otato | 0.79 |  |
|  |  | 黄瓜 Cucumber | 1.98 |  |
|  |  | 角瓜 Horned melon | 1.08 |  |
|  |  | 茄子 Eggplant | 1.19 |  |
|  |  | 青椒 Green pepper | 0.81 |  |
|  | 云南部分蔬菜产区 | 大白菜 Chinese cabbage | 6.55 | 058 |
|  | Some vegetable production | 生菜 Lettuce | 24.60 |  |
|  | areas in Yunnan | 小菠菜 Small spinach | 11.60 |  |
|  |  | 菠菜 Spinach | 8.15 |  |
|  | 西藏 | 马铃薯 Potato | 0.11 | 057 |
|  | Tibet | 豌豆 Pea | 0.06 |  |
|  |  | 蚕豆 Broad bean | 0.05 |  |
|  |  | 白菜 Cabbage | 0.06 |  |
|  |  | 萝卜 Radish | 0.06 |  |

目前，植物提取修复氟污染土壤的研究仍较少， 已报道的对氟具有较高富集作用的植物有茶树 *(Camellia sinensis)*、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、国 槐( *Sophora japonica*) 、臭椿( *Ailanthus altissima*) 、合 欢( *Albizzia julibrissin*) 等 11 .研究表明，在氟污染严 重的挪威西部森林土壤中，某些植物叶中氟含量高 达1100 mg • kg'1 055 .茶树是一种氟富集植物059 ,且 绝大部分富集在叶部，尤其是老叶，落叶中氟含量可 达2000 mg • kg'1以上051,0，茶树黄棪叶中氟的富集 量占全株的98.1%061 .在氟污染区域，可以种植氟积 累植物，同时结合其他修复技术，从而将氟从土壤中 去除.但是，已发现的氟积累植物种类较少，氟富集 植物的筛选将是今后工作的重点之一.

研究者们对不同地区不同植物的氟吸收能力进 行了大量研究，发现不同植物对氟的吸收富集能力 差异较大，筛选氟低积累植物种类或品种，对氟污染 土壤的安全利用具有重要意义.资料显示: 草本植物 含氟量为3 ~ 19 mg • kg'1，木本裸子植物含氟量为 0.02-4 mg • kg'1，木本被子植物含氟量为0.04-24 mg • kg'1 054 .胡志林052调查新疆天山草场牧草氟含 量发现，牧草氟含量在0.5 -9.4 mg • kg'1.文勇立 等053 调查发现，川西北牧草中氟含量冷季为3.14 mg • kg'1,暖季为 1.42 mg • kg'1.Loganathan 等 162 研 究发现，长期施用磷肥导致土壤中氟含量显著升高 的牧区，牧草中氟含量升高，通常接近3 mg • kg'1.

粮食作物的氟含量通常小于1 mg • kg'1 056 ,且 受土壤氟含量的影响较小，朱法华等063 调查发现， 高氟地区粮食作物中氟含量在0.70-0.85 mg • kg'1. 在清洁区不同蔬菜对氟的吸收富集能力存在一定差 异，但大多均较低.曹进等057 调查了西藏不同地区 蔬菜中的氟含量，其氟含量范围在 0.03 - 0.15 mg • kg'1.孟宪玺等056调查了松嫩平原蔬菜中氟含 量，该区域为非氟污染区，调查表明，黄瓜中氟含量 最高(1.19 mg • kg'1),马铃薯氟含量最低(0.79 mg • kg'1).而在污染区附近，蔬菜中氟含量显著高 于清洁区，且叶菜类蔬菜氟含量大于瓜果根茎 类063'64 .段敏等065 调查了西安郊区蔬菜氟含量，结 果显示，叶菜类氟含量的均值是茄果类的2.9 倍.研 究认为，空气氟污染可能是导致叶菜类氟含量较高 的原因之一022 .

植物不同组织对氟的吸收和积累存在显著差 异，通常，氟大量地积累在新陈代谢旺盛的器官066 ， 而营养贮存器官的氟积累量相对较小，即其含量变 化普遍呈现根＞叶＞茎和果实的递减规律067 .研究表 明，氟在水稻、花生和大豆中的分布，基本均符合上 述规律068'69 .但大量调查研究显示，并不是所有植 物都满足上述规律，何锋等058 发现，菠菜中氟含量 分布为老叶＞幼叶＞根.同时氟在植物体内的分布与 氟化物进入植物的途径有关，在氟污灌区植物体内 氟的含量分布为根＞叶＞壳和果实，而在受大气氟污 染的区域，植物主要由叶吸收氟，体内氟分布为叶＞ 根＞果实054 .大量调查研究表明，不同茶树各组织氟 含量分布不尽相同，但均呈叶片大于其他组织的规 律.Xie等070发现，废弃茶园中6种植物(其中一种 为茶树) 的氟富集含量为叶＞茎＞根.马立锋等051 研 究表明，茶树的氟富集能力为叶片＞吸收根＞主根＞ 茎，Fung等071研究也发现了相似的结果.

在氟污染区，可根据当地的种植习惯，有选择性 地种植氟低积累经济作物，如粮食作物、根茎类蔬菜 等，避免种植叶菜类等氟容易富集的品种.同时，将 植物阻隔技术与化学钝化技术联合应用，在修复氟 污染土壤中取得了理想效果.盆栽试验表明，苜蓿和 黑麦草中富集的氟含量与土壤水溶性氟或0.01 mol • L'1氯化钙浸提氟含量呈显著正相关072 .为了 减少氟在植物中的积累，可以在种植氟低积累作物 的同时添加一些相应的稳定剂.有研究表明，木炭和 竹炭的添加显著降低了茶树根和茶叶中的氟含量， 而对茶叶质量没有影响030 .

Alvarez—Ayuso等073研究了脱硫石膏在酸性土 壤中的施用对植物富集氟的影响，结果表明，植物地 上部分氟的积累量是22-65 mg • kg'1,随着脱硫石 膏施加量的增加，植物地上部分氟的富集量逐渐减 小，研究认为土壤中溶解性钙浓度的增加是导致氟 在植物中积累的重要限制因素.Ruan等074和马立峰 等075通过水培和盆栽试验研究了土壤pH和钙对 土壤氟活性和对茶树富集氟的影响，结果表明，添加 钙显著降低茶树对溶液中氟的吸收，在盆栽试验中 向土壤中添加 Ca( NO3) 2或 CaO 后均显著降低了茶 树叶片氟含量，但是添加两种钙的化合物之后并没 有降低土壤氟的有效性.添加钙使土壤中溶解性的 氟离子与钙形成CaF2沉淀是减少茶树对氟富集的 一个重要因素，但这并不是添加钙减小茶树富集氟 的唯一原因，研究者认为，钙的添加对细胞壁和细胞 膜渗透性的影响以及对氟存在形态的影响是减小茶 树对氟富集的重要原因.

1. 研究展望

综观国内外氟污染土壤研究成果，大量研究将 土壤氟分为: 水溶态、可交换态、铁锰氧化物态、有机 束缚态和残余固定态，其中主要以残渣态为主;在 水-土系统中，氟离子主要发生沉淀-溶解、络合-解 离、吸附-解析等反应.目前在氟污染土壤稳定化技 术、电动修复技术、生态修复技术方面已取得了很大 的进展，大量的研究为氟污染土壤的治理提供了一 定的理论依据.通过大量的植物和农作物氟含量调 查，筛选出氟富集植物和氟低积累植物，这对今后的 生态修复应用具有指导意义.但在氟污染土壤研究 中仍存在一些问题需进一步探索和研究:

1） 深入研究氟在土壤中的赋存机制.目前虽有 大量关于土壤 pH 值、钙离子等对土壤氟赋存形态 的影响研究，但研究结论不尽相同，氟在土壤中的吸 附、固定机制复杂，土壤对氟的作用通常是多重因素 的复合作用，土壤 pH 环境、钙铁铝等离子、土壤粒 径以及有机质等对土壤氟赋存形态的影响以及多种 影响因素对其的复合影响如何仍不清楚，另外，土壤 氟与微生物的相互作用机制仍不明确，氟对微生物 的毒害作用、微生物对氟的耐性机制、微生物对氟的 稳定/活化作用等都需开展系统的研究，这对研究土 壤氟的固定和去除具有重要意义.

2） 继续筛选氟富集植物和氟低积累农作物品 种.目前，已开展大量研究筛选氟富集植物和氟低积 累植物，但是已筛选出的氟富集植物种类有限，很难 在不同氟污染区域应用.另外，已报道的氟低积累植 物主要集中在几种作物，如能筛选出多种农作物种 类或者品种，将为生态修复在不同地区的应用奠定 理论基础.

3） 开发氟污染土壤联合修复技术.已报道的氟 污染土壤修复技术种类有限，修复技术单一.结合氟 污染土壤特征，开发新的氟污染土壤修复技术，或采 用多种修复技术联合修复，例如采用植物提取与淋 洗/电动等活化技术相结合，或者植物阻隔与化学钝 化技术相结合，取长补短，达到高效率、低成本的修 复效果.

参考文献

[1 Xue S-Y （ 薛粟尹） ，Li P （ 李 萍） ，Wang S-L （ 王胜 利） ， et al． Chemical forms of fluorine and influential factors in the mining areas of oases，Gansu P rovince， China. Journal of Agro-Environment Science （ 农业环境 科学学报） ，2012，31（ 12） : 2407－2414 （ in Chinese） [2 Mohapatra M ，Anand S，Mishra BK，et al． Review of fluoride removal from drinking water. Journal of Environ­mental Management，2009，91: 67－ 77

[3 Chen J-J （ 陈剑杰） ，Cao J-L （ 曹谨玲） ，Luo Y-J （ 罗 永巨 ） ， et al. Effects of nano-selenium on antioxidant capacity and histopathology of Cyprinus carpio liver under fluoride stress. Chinese Journal of Applied Ecology （ 应用生态 学 报） ，2013，24 （ 10） : 2970 － 2976 （ in Chinese）

[4 Chen Y-Y （ 陈玉银） ，Lu S-G （ 卢 升 高） . Fluoride

accumulation and distribution in mulberry insects near fluoride pollution sources. Chinese Journal of Applied Ecology （ 应 用 生 态 学 报） ，2002，13 （ 1） : 106 － 108 （ in Chinese ）

[5 Li Y-H （ 李 永华） ，Wang W-Y （ 王五 一） ，Hou S-F

（ 侯少范） . Safety threshold of fluorine in endemic fluo­rosis regions in China. Environmental Science （ 环境 科 学） ，2002，23（ 4） : 118－122 （ in Chinese）

[6 Zhu SF，Han D ，Zhou M ，et al． Ammonia enhanced

electrokinetics coupled with bamboo charcoal adsorption for remediation of fluorine-contaminated kaolin clay. Electrochimica Acta，2016，198: 241－ 248

[7 Chen H ，Yan M ，Yang X ，et al． Spatial distribution and

temporal variation of high fluoride contents in groundwa­ter and prevalence of fluorosis in humans in Yuanmou County ，Southwest China. Journal of Hazardous Mate- rials，2012，235－236: 201－209

[8 Wang X-F （ 王 兴 峰 ） . Actuality investigation and pre­

vention measures on fluorine pollution of soil in some aluminium factory area. Gansu Metallurgy （ 甘肃冶金） ， 2008，30（ 5） : 62－65 （ in Chinese）

[9 Li Q （ 李 青） ，Zhou L-B （ 周连碧） ，Zhu Y-B （ 祝怡

斌） . Review of heavy metal pollution remediation tech­nology in mine soil. Non-Ferrous Metal Engineering （ 有 色金属工程） ，2013，3（ 2） : 56－59 （ in Chinese）

1. Chen H-M （ 陈怀满） ，Zhu Y-G （ 朱永官） ，Dong Y-H

（ 董元华） ， et al. Environmental Soil Science. 2nd Ed. Beijing : Science Press ，2018 （ in Chinese ）

1. Yang J-Y （ 杨金燕） ，Gou M （ 苟 敏） . The research status of fluorine contamination in soils of China. Eco­logy and Environmnet （ 生 态 环 境 学 报 ） ，2017 ，26 （ 3） : 506－513 （ in Chinese ）
2. Yi C-Y （ 易 春瑶） ，Wang B-G （ 汪丙国） ，Jin M-G （ 靳孟贵） . Research progress of migration and transfor­mation laws of fluoride in ground water-soil-plant system. Safety and Environmental Engineering （ 安全 与 环境 工 程） ，2013，20（ 6） : 59－64 （ in Chinese）
3. Xie Z-M （ 谢正苗） ，Wu W-H （ 吴卫红） ，Xu J-M （ 徐 建民 ） . Translocation and transformation of fluorides in the environment and their biological effects. Progress in Environmental Science （ 环境科学进展） ，1999 ，7（ 2 ） : 41－ 54 （ in Chinese）
4. Pan H （ 潘 宏） ，Chen B-B （ 陈邦本） ，Fang M （ 方 明） . Discussion on mechanism of variations in content of water-soluble fluorine during desalinization of coastal saline soils of Jiangsu Province. Acta Pedologica Sinica （ 土壤学报） ，1993 ，30（ 4 ） : 416－422 （ in Chinese ）
5. Li C-H （ 黎成厚） ，Wan H-Y （ 万红友） ，Shi H-Q （ 师 会勤）， et al． Preliminary study on the water-soluble fluo­rine content in soil and the factors affecting it. Journal of Mountain Agriculture and Biology （ 山地农业生物学

报） ，2003，22（ 2） : 99'104 （ in Chinese） Loganathan P ，Gray CW，Hedley MJ，*et al．* Total and 029

soluble fluorine concentrations in relation to properties of soils in New Zealand. *European Journal of Soil Science* ， 2006，57: 411'421

Yu D-F （ 余 大 富 ） . Fluorine pollution in soil and its harm. *Environmental Science* （ 环 境 科 学 ） ， 1982， 3 （ 6） : 70' 74 （ in Chinese）

18

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

Yu Q-Y （ 于群英） ，Ci E （ 慈 恩） ，Yang L-Z （ 杨林 章 ） . Contents of different soil fluorine forms in North Anhui and their affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* （ 应用生态学报） ，2007，18（ 6） : 1333 ' 1340 （ in Chinese） Wenzel W ，Blum WEH*．* Fluorine speciation and mobi­lity in F-contaminated soils. *Soil Science* ，1992 ，153 : 357'364 Wang L-X （ 王 凌 霞） ，Fu Q-L （ 付 庆 灵） ，Hu H-Q （ 胡红青） ， *et al．* Fluorine content in tea leaf and fluo­rine fractionation in soils of tea gardens in Hubei P ro- vince. *Environmental Chemistry* （ 环境化学） ，2011 ，30 （ 3） : 662' 667 （ in Chinese） Elrashidi MA，Adriano DC，Workman SM，*et al．* Che­mical equilibria of fluorine in soils : A theoretical deve­lopment. *Soil Science*，1986，141: 274 ' 280 Liu Z-Y （ 刘征原） ，Hao R-B （ 郝瑞彬） . Environmen­tal geochemistry characteristics of fluorine and its biolo­gical effects. *Journal of Tangshan Teachers College* （ 唐 山师范学院学报） ，2007，29（ 2） : 34' 36 （ in Chi- nese） Zhang H-Y （ 张海 燕） ，Liu Y （ 刘 阳） ，Li J （ 李 娟） ， *et al* . Review of heavy metal contaminated soil remediation technology. *Sichuan Environment* （ 四 川 环 境） ，2010，29（ 6） : 138'141 （ in Chinese） Wang L-Q （ 王立群） ，Luo L （ 罗 磊） ，Ma Y-B （ 马 义兵）， *et al* . In situ immobilization remediation of heavy metals-contaminated soils : A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* （ 应用生态学报） ，2009，20 （ 5） : 1214'1222 （ in Chinese） Liang C-H （ 梁成华） ，Chen X-Z （ 陈新之） ，Li H-Z （ 李焕珍） ，*et al．* Effect of application phosphogysum on contents and adsorption characteristic of fluorine in alk- line soils. *Acta Scientiae Circumstantiae* （ 环境 科 学 学 报） ，1999，19（ 1） : 111'114 （ in Chinese） Cui J-X （ 崔俊学） ，Chen W （ 陈 文） ，Ouyang J （ 欧 阳津） . The effect of calcium on different species of fluo­rine in soil. *Guangzhou Chemistry* （ 广 州 化 学 ） ，2009， 34（ 9） : 13'18 （ in Chinese） Wang L-X （ 王凌霞） ，Hu H-Q （ 胡红 青） ，Min Y-L （ 闵艳林） ， *et al．* Simulated control of water-soluble fluo­ride content in tea garden soils. *Acta Scientiae Circum- stantiae* （ 环境科学学报） ，2011，31（ 7） : 1517 ' 1525 （ in Chinese ） Huang L （ 黄 雷） ，Zhang S-W （ 张时 伟） ，Shen Y （ 沈 彦 ） ，*et al．* Effect of the combination of calcium oxide and calcium magnesium phosphate fertilizer on water soluble fluorine content in soil. *Environmental Sci­ence ＆ Technology* （ 环境科学与技术） ，2016，39

（ suppl.2） : 109' 112 （ in Chinese）

Wang K-Y （ 王 开 勇 ） ，Yang L （ 杨 乐） ，Zhao T-Y （ 赵天一） ， *et al．* The environmental effect of organic materials on soil soluble fluorine. *Ecology and Environ­ment* （ 生态环境） ，2007，16（ 3） : 879 ' 882 （ in Chi- nese）

1. Gao H ，Zhang Z，Wan X. Influences of charcoal and bamboo charcoal amendment on soil-fluoride fractions and bioaccumulation of fluoride in tea plants. *Environ­mental Geochemistry and Health*，2012，34: 551' 562
2. Zhang Y-L （ 张 永利 ） ，Wang Y-J （ 王 烨 军） ，Song L （ 宋 莉） ， *et al．* Effects of N，P and K fertilizer on the concentration of fluoride in tea garden soil solution. *Soil and Fertilizer Sciences in China* （ 中国土壤与肥料） ， 2017，46（ 3） : 28'35 （ in Chinese）
3. An CJ ，Huang GH ，Wei J ，*et al．* Effect of short-chain organic acids on the enhanced desorption of phenan­threne by rhamnolipid biosurfactant in soil-water envi­ronment. *Water Research*，2011，45: 5501 ' 5510
4. Zou Z，Qiu R，Zhang W，*et al．* The study of operating variables in soil washing with EDTA. *Environmental Pol- lution*，2009，157: 229'236
5. Xu R ，Wang Y，Zhao A ，*et al．* Effect of low molecular weight organic acids on adsorption and desorption of fluo­ride on variable charge soils. *Environmental Geochemistry and Health*，2006，28: 141'146
6. Li Q （ 李 琼） ，Zeng Q-R （ 曾清如） . A technique for simultaneous removal of heavy metals ，arsenic and fluo­ride from contaminated soil by chelating agents. *Journal of Hunan City University* （ Natural Science） （ 湖 南城 市 学院学报: 自然科学版） ，2014，23（ 2） : 63' 66 （ in Chinese）
7. Kim DH，Jeon CS，Baek K ，*et al．* Electrokinetic reme­diation of fluorine-contaminated soil : Conditioning of anolyte. *Journal of Hazardous Materials* ， 2009 ， 161 : 565'569
8. Moon DH，Jo R，Koutsospyros A，*et al．* Soil washing of fluorine contaminated soil using various washing solu­tions. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxi- cology*，2015，94: 334'339
9. Yuan LZ ，Xu XJ，Li HY ，*et al．* Development of novel assisting agents for the electrokinetic remediation of heavy metal-contaminated kaolin. *Electrochimica Acta* ， 2016，218: 140'148
10. Guo SH，Fan RJ，Li TT，*et al．* Synergistic effects of bioremediation and electrokinetics in the remediation of petroleum-contaminated soil. *Chemosphere* ，2014 ，109 : 226'233
11. Yeung AT ，Gu YY. A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils. *Jour­nal of Hazardous Materials*，2011，195: 11' 29
12. Zhu SF ，Zhang J，Dong T. Removal of fluorine from contaminated field soil by anolyte enhanced electrokine- tic remediation. *Environmental Earth Sciences* ， 2009 ， 59: 379'384
13. Zhu S-F （ 朱书法） ，Du J-P （ 杜锦屏） ，Suo M-Y （ 索 美玉 ） ，*et al．* Alkaline electrolyte circulation enhanced

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

electrokinetic remediation of fluorine-contaminated soils. Ecology and Environmental Sciences （ 生态环境学报） ， 2009，18（ 5） : 1767－1771 （ in Chinese）

Zhu S-F （ 朱书法） ，Yan C-L （ 闫 春 丽） ，Dong T-Y （ 董铁有） ， et al． Anolyte enhanced electrokinetic reme­diation of fluorine-contaminated soils. Environmental Sci­ence （ 环境科学） ，2009，30（ 7） : 2082－2086 （ in Chi- nese）

Zhou M, Zhu SF, Liu Y, et *al* Removal of fluorine from contaminated soil by electrokinetic treatment driven by solar energy. Environmental Science and Pollution *Research,* 2013, 20： 5806-5812

Zhou M, Zhu SF, Liu F, *et al．* Pulse-enhanced electro- kinetic remediation of fluorine-contaminated soil. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2014, 31: 2008 － 2013

Zhou M, Zhu SF, Liu Y, *et al．* Electrokinetic remedia­tion of fluorine-contaminated soil using approaching cathodes. *Clean*: *Soil*, *Air*, *Water*, 2014, 42: 1771 － 1775

Zhou M, Wang H, Zhu SF, *et al．* Electrokinetic reme­diation of fluorine-contaminated soil and its impact on soil fertility. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 16907－16913

Zhu SF, Zhu D, Wang X. Removal of fluorine from red mud （ bauxite residue） by electrokinetics. *Electrochimica Acta*, 2017, 242: 300－306

Cui D-J （ 崔德杰） , Zhang Y-L （ 张 玉龙） . Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques. *Chinese Journal of Soil Science* （ 土 壤通报） , 2004, 35 （ 3 ） : 366－370 （ in Chinese）

Dickinson NM, Baker AJM, Doronila A, *et al*. Phytore­mediation of inorganics: Realism and synergies. *Interna­tional Journal of Phytoremediation*, 2009, 11: 97－114 Ma L-F （ 马立锋） , Ruan J-Y （ 阮建云） , Shi Y-Z （ 石 元值） , *et al．* Study on accumulation characteristics of fluorine in tea plants. *Acta Agriculturae Zhejiangensis* （ 浙江农业学报） , 2004, 16（ 2） : 46－48 （ in Chinese） Hu Z-L （ 胡志林） . Trace elements in soil and plant of Tianshan grassland. *Xinjiang Agricultural Sciences* （ 新 疆农业科学） , 1990, 62（6）: 257－260 （ in Chinese） Wen Y-L （ 文勇立） , Li H （ 李 辉） , Li X-W （ 李学 伟） , *et al．* Research on caparison of the content of trace element in soft and forage in Northwest Sichuan grass­land. *Acta Ecologica Sinica* （ 生 态 学 报 ） , 2007, 27 （ 7） : 2837－2846 （ in Chinese）

Wu D-S （ 吴代赦） , Wu T （ 吴 铁） , Dong R-B （ 董 瑞斌） , *et al．* Advances in absorption and enrichment of soil fluoride by plants. *Journal of Nanchang University* （ Engineering ＆ Technology） （ 南 昌 大学 学报: 工 科 版）, 2008, 30（2）: 103－111 （ in Chinese）

Li F （ 利 锋 ） . Soil fluorine and plants. *Guangdong Trace Elements Science* （ 广东微量元素科学） , 2004, 11（ 5） : 6－11 （ in Chinese）

Meng X-X （ 孟宪玺） , Zhang L-P （ 张丽萍） , Wang Z- Y （ 王宗义） , *et al．* Fluorine in the eco-environment in the southwestern of Songnen Plain. *Acta Ecologica Sinica* （ 生态学报） , 1988, 8（ 4） : 324－329 （ in Chinese）

1. Cao J （ 曹 进） , Zhao Y （ 赵 燕） , Liu J-W （ 刘箭 卫） , *et al．* Environmental fluorine level in Tibet. *Chi­nese Journal of Applied Ecology* （ 应 用 生 态 学 报 ） , 2000, 11（ 5） : 777－779 （ in Chinese）
2. He F （ 何 锋） , Duan C-Q （ 段昌群） , Hou Y-P （ 侯 永平 ） . Investigation of fluorine accumulation in some vegetables in Yunnan, China. *Ecology and Environmnet* （ 生态环境） , 2004, 13（ 3） : 327－329 （ in Chinese）
3. Wang TH, Lin CS, Wu C, *et al．* Fluorine content of Fukien teas. *Journal of Food Science*, 1949, 14: 98 －

103

1. Fung KF, Zhang ZQ, Wong JWC, *et al．* Fluoride con­tents in tea and soil from tea plantations and the release of fluoride into tea liquor during infusion. *Environmental Pollution*, 1999, 104: 197－205
2. Sha J-Q （ 沙济琴） , Zheng D-X （ 郑达贤） . Bioaccumu­lation characteristics of fluoride in tea tree *Astragalus． Fujian Tea* （福建茶叶）, 1993, 20（ 3）: 25－28 （ in Chinese）
3. Loganathan P, Hedley MJ, Wallace GC, *et al．* Fluoride accumulation in pasture forages and soils following long­term applications of phosphorus fertilisers. *Environmental Pollution*, 2001 , 115: 275－282
4. Zhu F-H （ 朱 法 华） , Zhang J-R （ 张 景 荣） , Yao S-P （ 姚素 平） . Fluorine distribution in plants of Xuzhou epidemic fluorosis area and its environmental signifi­cance. *Geological Journal of China Universities* （ 高校地 质学报）, 2001, 7（2）: 158－163 （ in Chinese）
5. Hu Y-D （ 胡永定） , Li J （ 李 炬） . Fluoride pollution and its characteristics in soil and vegetables in Jingmahe area. *Agro-Environmental Protection* （ 农业环境保 护 ） , 1993, 12（ 5） : 204－207 （ in Chinese）
6. Duan M （ 段 敏） , Ma W-X （ 马往校） , Sun X-T （ 孙 新涛） , *et al．* Analyses and assessment of fluorine pollu­tion situation in 10 kinds of vegetables in Xian. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* （ 安徽农业科学） , 2008 , 36（15）: 6267－6269 （ in Chinese）
7. Lan D, Wu D, Li P, *et al．* Influence of high-fluorine environmental background on crops and human health in hot spring-type fluorosis-diseased areas. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2008, 27: 335－341
8. Liang C-P （ 梁翠萍） , Liu L （ 刘 蕾） , Yu S-P （ 于书 萍） , *et al．* Technical analysis of groundwater and soil ecological management in high fluoride areas. *Water Sci­ences and Engineering Technology* （ 水科学与工程技 术）, 2015, 25（2）: 59－61 （inChinese）
9. Li R-B （ 李日邦） , Zheng D-X （ 郑达贤） , Wang L-Z （ 王丽珍） , *et al．* A study of fluoride absorption of by plants in soil-plant ecological system. *Acta Geographica Sinica* （地理学报） , 1986, 41（2）: 123－131 （in Chi- nese）
10. Chen G-J （ 陈 国 阶） . Discussion on the experiment of fluoride-containing sewage irrigation. *Environmental Sci­ence* （ 环境科学） , 1979, 4（ 2） : 13－ 17 （ in Chinese）
11. Xie ZM, Ye ZH, Wong MH. Distribution characteristics

of fluoride and aluminum in soil profiles of an abandoned tea plantation and their uptake by six woody species． Environment International，2001，26: 341－ 346

71] Fung KF，Zhang ZQ，Wong JWC，et al． Aluminium and fluoride concentrations of three tea varieties growing at Lantau Island，Hong Kong． Environmental Geochemistry and Health，2003，25: 219－232

72] Arnesen AKM． Availability of fluoride to plants grown in contaminated soils． Plant and Soil，1997，191: 13－ 25

1. nivarez-Ayuso E, Gimenez A, Ballesteros JC. Fluoride accumulation by plants grown in acid soils amended with flue gas desulphurisation gypsum. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192: 1659－1666
2. Ruan J, Ma L, Shi Y. et al. The impact of pH and cal­cium on the uptake of fluoride by tea plants ( Camellia sinensis L.) . Annals of Botany, 2004, 93: 97－105

75] Ma L-F ( 马立锋) , Ruan J-Y ( 阮建云) , Shi Y-Z ( 石 元值) , et al. Uptake of fluorine by tea plant ( Camellia sinensis) and the impact of calcium ( calcium oxide and calcium nitrate ) on F uptake. Chinese Journal of Soil Science ( 土壤通报) , 2005, 36( 1) : 85－ 87 ( in Chi­nese)

作者简介 袁立竹,男, 1987年生,博士. 主要从事污染土

壤修复研究. E-mail: yuanlizhu@ iae. ac. cn

责任编辑 肖 红

《应用生态学报》2017 年影响因子和总被引频次

据中国科学技术信息研究所发布的《2018年版•中国科技期刊引证报告（核心版）》，《应用生 态学报》2017年影响因子为2.123，在生态学类期刊中排名第2 位;总被引频次为13314，在生态学 类期刊中排名第2位.感谢各位读者、作者和专家的支持!

袁立竹，王加宁，马春阳，等. 土壤氟形态与氟污染土壤修复. 应用生态学报，2019，30( 1) : 10－20

Yuan L-Z，Wang J-N，Ma C-Y，et al. Fluorine speciation in soil and the remediation of fluorine contaminated soil. Chinese Journal of

Applied Ecology，2019，30( 1) : 10－20 ( in Chinese)