

张庆辉,刘兴旺,贺晓慧,等.包头市南郊污灌区农田表层土壤镧的平面空间分布特征[J].江苏农业科学,2016,44(4):463-466.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.04.129

包头市南郊污灌区农田表层土壤 镧的平面空间分布特征

张庆辉¹,刘兴旺²,贺晓慧¹,程莉¹,朱晋¹,同丽嘎¹,乌云塔娜¹,赵捷¹

(1.包头师范学院资源与环境学院,内蒙古包头 014030;2.包头师范学院化学学院,内蒙古包头 014030)

摘要:研究内蒙古包头市南郊污灌区农田表层土壤稀土镧(Pr)的分布特征,旨在为污灌区农田土壤环境质量评价及外源稀土Pr污染修复提供依据。采集包头市南郊污灌区农田表层土壤样品,测定样品中稀土Pr含量,将稀土Pr土壤背景值作为污灌区农田土壤外源稀土积累的参照基准值,分析土壤Pr二维空间分布规律。结果表明:南郊污灌区整个研究区土壤Pr含量范围7.34~12.80 mg/kg,是河套地区土壤Pr背景值8.2 mg/kg的0.90~1.56倍,整个研究区土壤Pr含量的平均值为10.12 mg/kg,是背景值的1.23倍。研究区所有取样点稀土Pr等值线分布图分析结果表明,稀土Pr在二维空间上具有明显的带状富集分布特征,表明外源稀土元素在农田表层土壤中积累富集的平面空间差异性。由结果可知,人类活动使污灌区农田土壤Pr超量积累,应该重视外源稀土Pr在污灌区农田土壤环境中的累积性变化,其对污灌区农田土壤生态环境具有不可忽视的潜在生态风险。

关键词:镧;分布特征;二维空间;农田表层土壤;污灌区

中图分类号: S151.9⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)04-0463-04

中国是世界稀土生产第一大国^[1]、全球稀土原料供应市场的主导者^[2](占稀土供应市场份额的95%^[3]),其中世界上最大的铁-轻稀土-钕共生白云鄂博矿床^[4],富含镧(La)、铈(Ce)、钐(Sm)、铕(Eu)等轻稀土元素,占全国储量的80%、世界储量的38%以上。镧(Pr)在大多数情况下以混合稀土形式被用作农用稀土、化工催化剂、金属材料的净化变质剂、永磁材料等^[5]。由于镧这种特殊而关键的用途,使得稀土矿产资源的开发既为中国经济发展作出举足轻重的贡献,也为世界科技进步和经济发展作出贡献,无论是以赣州重稀土还是以包头轻稀土为代表的生产方法,生产过程中产生的“三废”并随之扩散到产区土壤中的大量外源稀土元素,造成土壤污染并使土壤质量下降,严重影响到稀土原料产地经济社会与生态环境建设的可持续发展。

稀土元素的特征电子层结构 $[Xe]4f^{0-14}5d^{0-1}6s^2$ 趋于形成相对稳定的三价阳离子,因此稀土离子化学性质及生物效应具有高度的相似性^[6]。包括 Pr^{3+} 在内的稀土离子 Re^{3+} 、 Ca^{2+} 在性质和结构等方面都很相似,因而稀土又称为“超级钙”^[7],能取代生物体内的结合钙^[8],导致细胞损伤甚至凋亡,具有毒性效应。毒性效应指毒性重金属、有机污染物等毒物或药物对机体所致有害的生物学变化,如痉挛、致畸、致癌或致死等效应。源于日本的“痛痛病”和“水俣病”就是分别由毒性重金属Cd、Hg产生生态毒性效应的典型案例。由毒性重金属污染引起的缓变型地球化学灾害^[9]已成为全球性问题,毒性重金属在土壤-粮食-蔬菜系统中迁移会影响食

品安全并具有潜在的健康风险^[10],尤其是像中国这样的发展中国家更不能忽视其影响^[11]。稀土金属类属于毒性重金属,与重金属污染机制一样具有“低促高抑”的毒物兴奋效应,任何一种稀土元素都不是生物生长的必需元素,过量的稀土元素对生物显现出各种负面影响^[12]。中国作为世界级稀土生产大国,稀土金属生产过程中对土壤生态环境的不良影响日益引起全社会的重视,排入环境的微量稀土元素对环境的污染与毒性重金属^[13]、酸雨^[14]一样,成为全世界重要的环境问题^[15],因而外源稀土元素的环境问题已成为继重金属元素^[16]和持久性有机污染物^[17]环境问题后新的研究热点^[18]。

近年来,有关包头市外源稀土元素对当地生态环境影响等研究进展很快并取得不少研究成果,如徐清等证实,稀土、钢铁工业污水排放扩大了污染面积,在东部麻池镇南部城梁一带形成条带状污染区域(属四道沙河污灌区)^[19],区内表层土壤轻稀土含量分布特征的高度一致性与该地区稀土产业和钢厂尾矿堆积与排放有密切关系;张庆辉等证实,包头市南郊四道沙河污灌区部分农田轻稀土总量189.48 mg/kg,是河套地区土壤稀土背景值总量135.53 mg/kg的1.40倍,表现为非常明显的轻稀土富集型^[20-21]。这些都集中研究了镧系元素系列或轻稀土元素系列,但对当地农田污灌区土壤Pr分布特征及其影响没有专门研究。因而本研究在这些研究的基础上对南郊污灌区进行密度为5个/km²组合大样(每10个小样组合为1个大样)的阶段性的采样,详细分析、揭示污灌区农田土壤外源稀土Pr元素的二维空间分布特征,以为包头市农田土壤稀土污染预警和污染水平评价等提供理论参考。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

包头市是中国重要的基础工业基地和全球轻稀土产业中

收稿日期:2015-04-12

基金项目:国家自然科学基金(编号:41461074)。

作者简介:张庆辉(1961—),男,甘肃定西人,教授,从事自然资源开发与环境评价的教学、研究工作。E-mail:zhqh200549@126.com。

心,被誉为“草原钢城”“稀土之都”。包头市地处黄河之滨,地理坐标范围为 $109^{\circ}15'12'' \sim 111^{\circ}26'25''E$, $40^{\circ}14'56'' \sim 42^{\circ}43'49''N$,属温带季风半干燥气候;年平均气温为 $6.5^{\circ}C$,最热时间在6月底至7月初,最高温度 $34.7^{\circ}C$;年平均降水量为 $300 \sim 350 \text{ mm}$,7—8月份降水量约占年降水量的54%,枯水年降水量仅 131.5 mm ,年平均蒸发量 2094 mm 。

研究区范围北起京包—包兰铁路线,南至黄河北岸自然界限,西起昆都仑河东岸自然界限,东至滨河开发区西边界及小白河湿地。该区基本上以小白河西进水闸到黄河乳牛场之间的连线为界,东部为四道沙河污灌区,以自流灌溉为主;西南部为昆都仑河污灌区,以小型水泵提灌为主。昆都仑河灌区地貌属于黄河冲积平原,四道沙河灌区地貌为大青山山前冲积扇倾斜平原的前缘区域,海拔在 $1011 \sim 1003 \text{ m}$ 之间。污灌区土质多为沙壤土、沙土和灌淤土,渗透力强。表层土($0 \sim 25 \text{ cm}$) pH值为 $7.02^{[22]}$ 。种植的粮食作物以玉米为主,有少量蔬菜。

1.2 样品采集与分析方法

1.2.1 样品采集 研究区有代表性的污水灌溉区农田地势平坦、土壤较均匀,并以当地农户为单位划分成面积较小的田块,故采样方法采用“梅花形”^[23]取样,取样区范围见图1。每 2000 m^2 内的农田田块内按“梅花形”布置并采取10个土壤小样(采样深度 $0 \sim 20 \text{ cm}$),每10个土壤小样采用1/4缩分法组合成1个土壤大样,共采集土壤大样样品36个。土壤样品带回实验室自然阴干,用尼龙筛截取 0.15 mm (100目)粒级的样品,用于测定稀土元素Pr。

1.2.2 分析方法 对稀土元素Pr的分析采用等离子质谱法,在Perkin-Elmer Elan 6000型等离子质谱仪(ICP-MS)上完成,整个分析过程均进行了系统的质量保证。对每个样

品的目标元素进行7次平行测定,测定稀土元素含量的相对标准偏差(RSD,%)范围均小于5%,分析精度达到试验要求。

1.3 数据处理

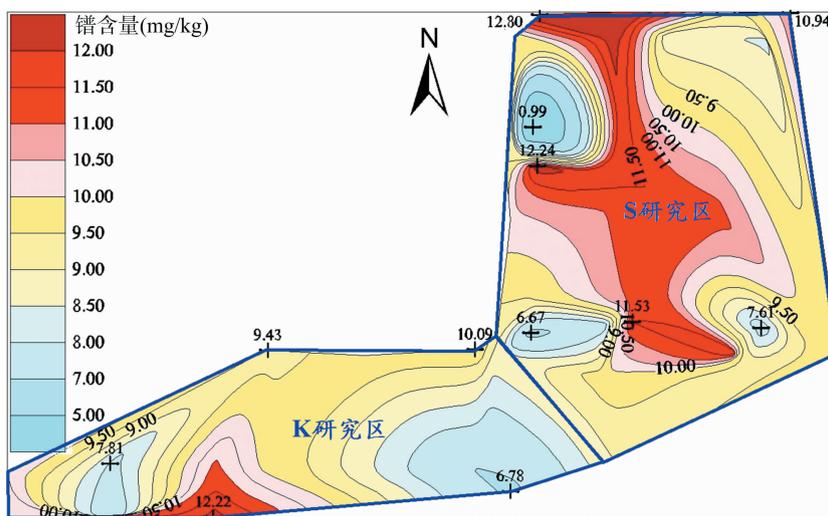
试验数据采用Excel软件进行处理和分析;采用MapGIS 67软件制作空间插值样品含量等值线图。

2 结果与分析

本项目的阶段性研究实施过程中,在研究区(图1中的K、S研究区)共取土壤组合样品36个,样品分析结果见表1。根据表1的数据作研究区农田土壤Pr等值线分布图(图1)。表1中1~9号样品取自昆都仑河污灌区(图1中K研究区)范围,10~36号取自四道沙河污灌区(图1中S研究区)范围。

表1 研究区农田土壤样品稀土镨元素含量

样号	Pr含量 (mg/kg)	样号	Pr含量 (mg/kg)	样号	Pr含量 (mg/kg)
1	10.75	13	10.36	25	11.57
2	10.50	14	9.49	26	12.59
3	7.34	15	9.56	27	11.53
4	7.81	16	9.49	28	11.24
5	12.22	17	12.24	29	8.72
6	11.11	18	12.80	30	11.85
7	9.62	19	9.80	31	9.49
8	9.43	20	7.58	32	9.28
9	9.60	21	11.03	33	7.61
10	10.09	22	12.27	34	8.40
11	8.68	23	9.29	35	9.86
12	9.21	24	11.16	36	10.94



K研究区、S研究区分别代表昆都仑河污灌区、四道沙河污灌区

图1 研究区稀土镨元素等值线分布

整个研究区第一阶段采取土壤样品总数36个,土壤Pr含量范围 $7.34 \sim 12.80 \text{ mg/kg}$,是河套地区土壤Pr背景值 $8.2 \text{ mg/kg}^{[19]}$ 的 $0.90 \sim 1.56$ 倍;整个研究区土壤Pr含量的平均值为 10.12 mg/kg ,是背景值的 1.23 倍;接近背景值的样品有5个($7.34 \sim 8.40 \text{ mg/kg}$),其余样品含量都高于背景值,占总样点数的 86.11% 。

昆都仑河污灌区(表1中1~9号样、图1中K研究区)土壤稀土镨含量范围为 $7.344 \sim 12.220 \text{ mg/kg}$,最大值是河套地区土壤Pr背景值 8.2 mg/kg 的 $0.90 \sim 1.49$ 倍;平均含量 9.82 mg/kg ,是河套地区土壤Pr背景值的 1.20 倍。

四道沙河污灌区(表1中10~36号样取样范围、图1中S研究区)土壤稀土Pr含量范围为 $7.577 \sim 12.800 \text{ mg/kg}$,是

河套地区土壤 Pr 背景值 8.2 mg/kg 的 0.92 ~ 1.56 倍;平均含量 10.23 mg/kg,是河套地区土壤 Pr 背景值的 1.25 倍。

因此对上述 2 个相对独立的污灌区(图 1 中 K、S 研究区)农田土壤 Pr 平均值差别较大的原因进行分析。昆都仑河污灌区位于该河下游,河槽内污灌取水口最高水位海拔为 986.36 m,比污灌区农田平均海拔 992 m 低 5.64 m,因而当地采用水泵提灌方式灌溉(取水口提灌点扬水高程为 7.76 m)。昆都仑河流域大部分的排污口都在铁路以北,污水中稀土元素主要以悬浮态、溶解态形式(悬浮态 > 溶解态)^[24]在水中迁移。昆都仑河污灌区农田土壤 Pr 含量低于四道沙河污灌区农田土壤 Pr 含量,可能是由碱性环境地球化学障、湿地生态系统、人为确定提灌时间这 3 个因素造成。

(1)碱性环境地球化学障因素。昆都仑河这种季节性很强的河槽区段,经常是雨季大水浸漫^[25],旱季排水不良,水动力复杂多变,到夏季炎热少雨季节当地蒸发量(年平均蒸发量 2 094 mm)远远大于降水补充量,使河水流量大大降低,强烈蒸发作用下近似于盐漠环境^[26]的裸露河槽,盐碱化程度迅速提高^[27-28],使土壤-水系沉积物中含碱量很高,进而提高流经该段河槽污水的 pH 值。pH 值升高使河槽中土壤-水系沉积物对 Pr³⁺的吸附量逐渐增大,而且弱碱性或碱性更有利于吸附^[29]。河槽土壤-水系沉积环境 pH 值的提高形成的碱性环境地球化学障,加强了河槽土壤-水系沉积物对污水中 Pr³⁺的吸附,降低了污水中 Pr 含量。

(2)河槽湿地生态系统因素。昆都仑河污灌区提灌点以上的河槽宽(300 ~ 500 m),水流流速变缓,该河段生长大量小叶锦鸡儿、芦苇,形成小型的河漫滩、河心滩小叶锦鸡儿-芦苇湿地生态系统。当上游污水口排入昆都仑河的污水经过该湿地生态系统时,植物发达的根系等作用对污水经过过滤、吸收等方式富集 Pr 而净化除去污水中一部分 Pr³⁺,降低了污水中 Pr 含量。至于地球化学障和湿地生态系统作用对该段河槽湿地土壤、水系沉积物中 Pr 含量及其分布特征的影响,还有待于开展专门的研究。

(3)人为确定提灌时间因素。昆都仑河污灌区通过提灌方式灌溉,提灌时,农民会详细观察水质的清澈度,如果水太混浊,农民就不提灌了。污灌区农民多年来在当地河边生活并利用该河污水,他们对河流污水水质变化特征的认识比较明确。

上述 3 个方面的可能性因素,造成本研究区昆都仑河污灌区(图 1 中的 K 研究区)农田土壤 Pr 平均含量为 9.82 mg/kg,低于四道沙河污灌区土壤 Pr 平均含量(10.23 mg/kg)。

四道沙河污灌区(图 1 中的 S 研究区)利用污水的方式为自流灌溉。四道沙河污灌区属于四道沙河及其中、上游支流区,河槽宽度一般为 3 ~ 6 m,没有上述(1)(2)2 个自然因素决定了河内灌溉农田的污水没有自然净化的过程,年季污水混浊度没有明显区别。河槽高度或高于灌溉区农田高度,或基本一致,或稍低 1 ~ 2 m。在河槽稍低于灌溉农田的区段,只加上拦水小堤或小水闸就能达到自流灌溉。因此污灌时污水挟裹悬浮物一起涌入灌溉区农田。这种情况形成了该灌溉区农田土壤稀土 Pr 平均含量达 10.23 mg/kg,在目前研究所取的 27 个样品中,除 3 个样品(11.33、34 号样)接近于

土壤背景值外,其他采样点的土壤 Pr 含量均大于土壤背景值,占总采样点的 88.89%。

从图 1 中 K、S 2 个研究区所有取样点稀土 Pr 等值线分析表明,稀土 Pr 在空间上具有明显的带状富集特征,反映了研究区微地形高度的差异引起污水汇聚的差异,进而形成了外源稀土元素在水平方向上积累富集的平面空间差异性。在上述区域后续的研究中,计划还要进一步加密取样点并适当布置土壤剖面,提高研究精度,揭示稀土 Pr 在污灌区三维空间的分布规律。

3 讨论与结论

3.1 Pr 对农作物及人体健康的影响

对农作物的影响如 200 L mol/L 镉胁迫下,100 ~ 150 mg/L Pr 所浸小麦种子萌发过程中根生长、根尖细胞有丝分裂指数、A-淀粉酶、抗坏血酸过氧化物酶(APX)及过氧化氢酶(CAT)的活性明显受到抑制,而丙二醛(MDA)含量明显增加^[30],表现为对小麦的遗传毒性;任艳芳等证实,当 Pr 浓度达到 230 μmol/L 时,与 50 μmol/L Cd 协同作用,使金优 207 水稻幼苗根系的生长和根系活力明显受到抑制,水稻根系也会受到严重毒害^[31]。

对人体健康的影响如杨辉等证实,PrCl₃ 能引起人血淋巴细胞微核率显著升高,PrCl₃ 起到诱变剂或纺锤丝毒剂的作用,具有一定的遗传毒性,且遗传毒性随试验处理浓度的提高(5 ~ 100 μg/mL)而增强^[32]。廖沛球等通过对 Wistar 大鼠腹腔注射浓度分别为 2、10、50 mg/kg Pr(NO₃)₃ 168 h 后,Pr(NO₃)₃ 会通过改变大鼠体内酶代谢而造成肝脏线粒体中的能量代谢(脂肪、糖代谢)紊乱,同时还改变肾脏中渗透质的平衡,影响肾脏对氨基酸的重吸收和利用^[33]。由于试验鼠基因序列和人类较为接近,而且 Pr 在小鼠体内表现出的毒性效应又与人体非常相似,研究成果对于稀土选冶型城市农田稀土污水灌溉区正确认识稀土元素对人体健康的危害、预防具有重要的理论借鉴意义。稀土的遗传毒性影响生物种群质量,也影响种群结构数量。因此稀土元素对人类的毒性影响,既会影响稀土工业产区当代居民的身体健康,更严重的是还会通过遗传而影响后代人的正常发育及健康等。污灌区农田土壤外源 Pr 被农作物吸收(包括粮食和蔬菜)而影响其质量,并通过食物链影响人体健康。有关外源 Pr 通过污灌区农田土壤-植物(粮食和蔬菜)系统而进入人体(当地居民)的稀土元素量及其累积过程等定量分析与详细研究,在本试验的后续研究中将会进一步深入揭示。

3.2 结论

研究区土壤 Pr 含量范围 7.34 ~ 12.80 mg/kg,是河套地区土壤 Pr 背景值 8.2 mg/kg 的 0.90 ~ 1.56 倍,整个研究区土壤 Pr 含量的平均值为 10.12 mg/kg,是背景值 8.2 mg/kg 的 1.23 倍。接近于背景值的样品有 5 个(7.34 ~ 8.40 mg/kg),其余样品都大于背景值,占总样点数的 86.11%。人类活动使污灌区农田土壤 Pr 超量积累,应该重视外源 Pr 在污灌区农田土壤环境中的累积性变化,认识其对污灌区农田土壤生态环境具有不可忽视的潜在生态风险。

致谢:感谢郭殿繁、王铭、杨德彬、皇学良、穆卓宇、刘媛媛、冯林婷、金慧亮、苏龙、高文邦、杭韦韦、刘强、吕伟、安呈祥

等野外采样、室内样品制作及数据处理等工作过程中的积极参与和辛勤劳动!

参考文献:

- [1] Wübbecke J. Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry [J]. *Resources Policy*, 2013, 38 (3): 384 – 394.
- [2] Du X, Graedel T E. Uncovering the end uses of the rare earth elements [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461 – 462: 781 – 784.
- [3] Das N, Das D. Recovery of rare earth metals through biosorption: An overview [J]. *Journal of Rare Earths*, 2013, 31 (10): 933 – 943.
- [4] Wang L, Liang T, Zhang Q, et al. Rare earth element components in atmospheric particulates in the Bayan Obo mine region [J]. *Environmental Research*, 2014, 131 (4): 64 – 70.
- [5] Gonzalez V, Vignati D A L, Leyval C, et al. Environmental fate and ecotoxicity of lanthanides: are they a uniform group beyond chemistry? [J]. *Environment International*, 2014, 71: 148 – 157.
- [6] 顾雪元, 王晓蓉, 顾志忙. 稀土在土壤-植物系统中的分馏效应及影响因素 [J]. *环境科学*, 2002, 23 (6): 74 – 78.
- [7] Zhang L P, Chen M, Yang P. Effects of ytterbium on outward K^+ currents in NIH3T3 cell [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (3): 246 – 250.
- [8] 凤志慧, 王玺, 张孙曦, 等. 稀土元素 La, Gd 和 Ce 对培养大鼠细胞生物学效应的研究 [J]. *中华核医学杂志*, 2001, 21 (2): 111 – 114.
- [9] 陈明, 冯流, 周国华, 等. 缓变型地球化学灾害: 特征、模型和应用 [J]. *地质通报*, 2005, 24 (10): 916 – 921.
- [10] 齐鹏, 张仁陟, 张伯尧, 等. 兰州市土壤-蔬菜系统典型重金属空间评价及健康风险分析 [J]. *干旱区地理*, 2012, 35 (1): 162 – 170.
- [11] Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment [J]. *The Science of the Total Environment*, 2014, 468 – 469: 843 – 853.
- [12] Adibi N, Lafhaj Z, Gemechu E D, et al. Introducing a multi-criteria indicator to better evaluate impacts of rare earth materials production and consumption in life cycle assessment [J]. *Journal of Rare Earths*, 2014, 32 (3): 288 – 292.
- [13] 石娟娟, 赵艳玲, 何厅厅, 等. 金矿区土壤铅和铜空间结构及变异规律 [J]. *江苏农业科学*, 2014, 42 (7): 373 – 375, 376.
- [14] 房春生, 王帆, 刘多, 等. 模拟酸雨对白菜体内铅、镉富集的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2013, 41 (8): 323 – 326.
- [15] Sun Z, Wang L, Zhou Q, et al. Effects and mechanisms of the combined pollution of lanthanum and acid rain on the root phenotype of soybean seedlings [J]. *Chemosphere*, 2013, 93 (2): 344 – 352.
- [16] 胡潇潇, 李建龙, 刚成诚, 等. 张家港市土壤-水稻生态系统重金属分配状况 [J]. *江苏农业科学*, 2012, 40 (5): 324 – 327.
- [17] 曹建荣, 张保华, 董杰, 等. 鲁西粮食主产区耕地土壤重金属与有机氯农药污染状况研究 [J]. *江苏农业科学*, 2010, 38 (1): 307 – 309.
- [18] 章海波, 骆永明, 赵其国, 等. 香港土壤研究 V. 稀土元素的地球化学特征 [J]. *土壤学报*, 2006, 43 (3): 383 – 388.
- [19] 徐清, 刘晓端, 汤奇峰, 等. 包头市表层土壤多元素分布特征及土壤污染现状分析 [J]. *干旱区地理*, 2011, 34 (1): 91 – 99.
- [20] 张庆辉, 同丽嘎, 程莉, 等. 污灌区农田表层土壤稀土元素分布特征 [J]. *江西农业大学学报*, 2012, 34 (3): 614 – 615, 618.
- [21] 张庆辉, 王贵, 赵捷, 等. 包头市四道沙河流域污灌区稀土元素的分布特征 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40 (5): 186 – 190, 198.
- [22] 郭鹏然, 贾晓宇, 段大成, 等. 稀土工业污染土壤对外源钆的吸附行为研究 [J]. *环境科学*, 2009, 30 (10): 3060 – 3066.
- [23] 王贵, 张庆辉, 程莉, 等. 内蒙古包头市污灌区农田土壤钆的潜在生态风险评价 [J]. *江苏农业科学*, 2012, 40 (7): 344 – 346.
- [24] 何江, 米娜, 匡运臣, 等. 黄河包头段水环境中稀土元素的形态及分布特征 [J]. *环境科学*, 2004, 25 (2): 61 – 66.
- [25] 冯广平, 姜卉芳, 董新光, 等. 干旱内陆河灌区地面灌溉条件下土壤水盐运动规律研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25 (3): 82 – 84.
- [26] 邓怀敏, 吉力力·阿不都外力, 葛拥晓. 艾比湖干涸湖底盐漠土壤环境特征分析 [J]. *水土保持研究*, 2013, 20 (6): 14 – 18.
- [27] 李取生. 苏打盐碱土地区不同土地利用类型的地表水分蒸渗特征 [J]. *干旱区地理*, 2006, 29 (1): 9 – 13.
- [28] 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥. 模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响 [J]. *环境科学*, 2012, 33 (12): 4100 – 4107.
- [29] 何江, 米娜, 匡运臣, 等. 黄河沉积物对稀土元素的吸附特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2004, 24 (4): 607 – 612.
- [30] 何俊瑜, 任艳芳, 任明见, 等. 镉对镉毒害下小麦种子萌发的缓解效应 [J]. *中国稀土学报*, 2010, 28 (1): 97 – 103.
- [31] 任艳芳, 何俊瑜, 周国强. 镉对镉胁迫下水稻幼苗根系生长和根系形态的影响 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19 (1): 102 – 107.
- [32] 杨辉, 嵇庆, 张锡然. 氯化钇和氯化镉对入血淋巴细胞微核率的影响 [J]. *中华预防医学杂志*, 1998, 32 (3): 156 – 158.
- [33] 廖沛球, 薛蓉, 吴亦洁, 等. 给药硝酸镉后大鼠尿液和血清的核磁共振代谢组学研究 [J]. *分析化学*, 2012, 40 (9): 1421 – 1428.