

## 基于地下水安全的六价铬土壤环境基准值推导案例

顾 熙, 陈扣平, 吴吉春

### Derivation case of Cr(VI) soil environmental criteria based on groundwater safety

GU Xi, CHEN Kouping, and WU Jichun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307050>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于FEFLOW的三维土壤-地下水耦合铬污染数值模拟研究

Numerical simulation of three-dimensional soil-groundwater coupled chromium contamination based on FEFLOW

刘玲, 陈坚, 牛浩博, 李璐, 殷乐宜, 魏亚强 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 164-174

#### 区域地下水污染调查取样点布设量化分配方法

Quantitative sample distribution in regional groundwater contamination investigation

李颖智, 蔡五田, 耿婷婷, 张涛, 张智印 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 24-30

#### 鄂尔多斯浩勒报吉水源地开采地下水的环境影响分析

Inspection and assessment of the environmental impacts of groundwater exploitation at the Haolebaoji wellfield in Inner Mongolia

王旭升, 尹立河, 方坤, 张俊, 王晓勇 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 5-5

#### 中试尺度下可渗透反应墙位置优化模拟——以铬污染地下水场地为例

A numerical simulation study of the position optimization of a pilot-scale permeable reactive barrier: a case study of the hexavalent chromium contaminated site

吕永高, 蔡五田, 杨骊, 边超, 李敬杰 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 189-195

#### 基于高斯过程回归的地下水模型结构不确定性分析与控制

Quantification and reduction of groundwater model structural uncertainty based on Gaussian process regression

钟乐乐, 曾献奎, 吴吉春 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 1-1

#### 地下水环境中的硫代砷研究进展

Advances in thioarsenic in groundwater systems

严克涛, 郭清海 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 132-141



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307050

顾熙, 陈扣平, 吴吉春. 基于地下水安全的六价铬土壤环境基准值推导案例 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 179-189.  
GU Xi, CHEN Kouping, WU Jichun. Derivation case of Cr(VI) soil environmental criteria based on groundwater safety[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 179-189.

## 基于地下水安全的六价铬土壤环境基准值推导案例

顾熙, 陈扣平, 吴吉春

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023)

**摘要:** 重金属污染物六价铬 [Cr(VI)] 毒性较大, 迁移性强, 对地下水安全带来很大威胁, 现行相关土壤标准多忽视了地下水安全, 亟需制定基于地下水安全的 Cr(VI) 土壤环境基准值为污染场地监管提供支撑。调研借鉴国外制定基于地下水安全的污染物环境基准值的方法, 以浙江黏壤土、江苏壤质砂土和吉林壤质黏土为研究对象, 进行室内静态吸附试验, 获得 3 种土壤的 Cr(VI) 分配系数。土壤参数及含水层相关参数通过查阅调研国内文献获得, 采用美国环境保护署在土壤筛选指南中提出的土壤筛选值 (soil screening level, SSL) 方法, 基于《地下水质量标准》(GBT 14848—2017) 反推得到基于地下水安全的土壤环境基准值。研究表明: 基于地下水安全的 Cr(VI) 土壤环境基准值分别为 0.944, 0.690, 0.514 mg/kg, 研究结果与国外以保护地下水安全为目的的基准值较为接近, 但各研究地区土壤性质的差异使得基准值有所差别。因此各地监管机构在完善土壤环境质量评价体系时应当构建各地土壤及含水层参数数据库, 为本地区土壤污染治理提供参考。研究结果可为我国各地区推导基于地下水安全的重金属土壤环境基准值提供科学依据。

**关键词:** 环境基准; 六价铬; 土壤筛选值模型; 地下水安全; 分配系数

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0179-11

## Derivation case of Cr(VI) soil environmental criteria based on groundwater safety

GU Xi, CHEN Kouping, WU Jichun

(School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

**Abstract:** The heavy metal pollutant Cr (VI) has high toxicity and strong mobility, posing a great threat to groundwater safety. The current relevant soil standards often overlook groundwater safety. It is urgent to establish a Cr(VI) soil environmental reference value based on groundwater safety in order to provide support for the supervision of contaminated sites. In order to determine the calculation method of soil environmental reference value for groundwater protection that is in line with China's characteristics, research and derivation of soil environmental reference value based on groundwater safety at home and abroad, and draw reference from foreign methods for formulating environmental reference value of pollutants based on groundwater safety. Taking Zhejiang clay loam, Jiangsu loamy sandy soil and Jilin loamy clay as research objects, the distribution coefficients of Cr(VI) in the three soils were obtained through indoor static adsorption tests. The soil parameters and aquifer-related parameters of the three soils were obtained through literature research. The soil screening level (SSL)

收稿日期: 2023-07-31; 修订日期: 2023-09-20

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC1809102)

第一作者: 顾熙 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事地表水-地下水相互关系研究工作。E-mail: [MF21290005@smail.nju.edu.cn](mailto:MF21290005@smail.nju.edu.cn)

通讯作者: 陈扣平 (1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事地表水-地下水相互关系研究工作。E-mail: [kpchen@nju.edu.cn](mailto:kpchen@nju.edu.cn)

method proposed by the United States Environmental Protection Agency in the Soil Screening Guidelines was adopted, based on groundwater quality standards (GBT14848—2017), a soil environmental reference value aiming at groundwater protection is obtained. The results show that the baseline values of Cr(VI) soil environment based on groundwater safety were 0.944 0.690, 0.514 mg/kg, respectively. The results are close to the reference values of foreign countries for the purpose of protecting groundwater safety. However, the differences of soil properties in each study area make the final base values different. Therefore, when improving the soil environmental quality system, local regulatory agencies should build a database of soil and aquifer parameters to help soil pollution control. The research results can provide scientific basis for deducing the environmental reference value of heavy metal soil based on groundwater safety in various regions of China.

**Keywords:** environmental criteria; Cr(VI); SSL model; groundwater protection; distribution coefficient

铬(Cr)是环境中常见的重金属,主要来源于钢铁制造等工业生产,不同价态Cr的性质存在很大差异,其中Cr(VI)毒性较大,有强致癌作用,对人体健康危害较大,同时也是地下水中常见的迁移性污染物<sup>[1-2]</sup>。当前我国的Cr污染问题备受关注,2014年发布的《全国土壤状况调查公报》<sup>[3]</sup>提出我国土壤中Cr的点位超标率达1.1%,城市中废弃工业区搬迁后遗留在场地内的Cr渣堆会在降水的作用下产出含Cr淋溶液,造成大面积环境污染<sup>[4]</sup>。科学研究Cr(VI)土壤环境基准值并制定完善的土壤质量标准对Cr(VI)污染防治具有重要意义。

环境基准值是指环境中污染物对特定保护对象不产生有害影响的最大浓度值<sup>[5]</sup>,多运用于国家治理环境污染和保护生态环境。环境基准值的制定已经成为凸显国家环境科学研究能力的重要工作<sup>[6-7]</sup>。美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)1996年发布土壤筛选指南,对住宅、工商业和建筑工地进行土壤筛选值的推导并介绍土壤筛选值(soil screening levels, SSL)方法,该方法主要适用于污染物从土壤迁移至地下水的情况<sup>[8]</sup>;加拿大环境部长理事会(Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME)1996年通过对不同用地类型的分析,制定3层次的风险评估体系并推导出符合当地情况的污染场地土壤质量指导值(soil quality guidance, SQG)<sup>[9]</sup>;新西兰针对煤气加工和石油烃等特定污染场地颁布了土壤指导值(soil guideline value, SGV)<sup>[10]</sup>;英国环境署(Environment Agency, EA)2002年公布污染场地报告(contaminated land report, CLR),主要评估污染物的潜在风险,提出用于评价人体健康风险的污染场地模型(the contaminated land exposure assessment model, CLEA)<sup>[11-12]</sup>。我国2014年颁布《污染场地风险评估技术

导则》(HJ 25.3—2014)<sup>[13]</sup>,该导则与《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)<sup>[14]</sup>都成为我国早期土壤环境质量评价标准的重要组成部分,2018年进一步颁布《土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)<sup>[15]</sup>和《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)<sup>[16]</sup>。可见各国土壤环境基准值的制定主要考虑防治土壤污染和保护人体健康,忽略了保护地下水的安全,只有少部分如美国EPA等针对地下水安全颁布土壤环境基准值。

在各国政策法规的指导下,国内外学者也基于不同保护对象开展了土壤环境基准值研究。

在保护人体健康的土壤环境基准值研究方面, Mitchell等<sup>[17]</sup>基于人体健康的指导值,对纽约市区花园土壤中的铅、钡、锌、镉进行基准值研究;马杰等<sup>[18]</sup>基于人体潜在健康风险,推导重庆市煤矸山周边土壤镉的环境基准值。

在保障食品安全的土壤环境基准值研究方面,于蕾<sup>[19]</sup>以国家食品卫生标准为基础对山东典型土壤的锌、铜、铅、镉环境基准值进行研究;Rmkens等<sup>[20]</sup>基于水稻的食用质量标准推导土壤镉的基准值。

在保护农作物的土壤环境基准值研究方面, Brus等<sup>[21]</sup>基于农作物质量标准,通过回归模型计算了荷兰土壤中镉的基准值;王晓南等<sup>[22]</sup>进行了Cr(VI)对保定市农田作物生长影响的生态毒理学试验并计算Cr(VI)土壤环境基准值。

在保护地下水安全的土壤环境基准值研究方面,王莹等<sup>[23]</sup>以保护地下水安全为目的,通过室内模拟淋溶试验计算了成都农田土的汞、镉、铅、砷环境基准值;梁捷等<sup>[24]</sup>通过野外调研和室内试验,基于地下水安全制定了海南省红壤铜、镉、铬、镍、铅、砷的土壤环境基准值。

目前已有的土壤环境基准值研究主要基于人体和农作物健康开展, 考虑地下水安全的土壤环境基准值研究匮乏, 但是地下水对于城市发展和人类日常生活至关重要, 是需要重点保护的對象。此外, 土壤环境基准值的研究大多针对常见重金属, 如砷、镉、汞和铅, 缺乏针对 Cr(VI) 的环境基准值研究, 但是 Cr(VI) 的强迁移性和毒性使得其应当成为污染场地监管和治理的重点之一。

因此本文开展基于地下水安全的 Cr(VI) 土壤环境基准值研究。国外基于保护地下水的土壤环境基准值计算方法并不完全相同, 且各方法的应用条件和优缺点也不同, 此外部分方法采用当地的数据库推荐值赋值, 我国幅员辽阔, 各地区土壤类型和水文地质条件复杂多变, 相关参数不符合我国的实际情况。综

上, 采用高效便捷的美国 EPA 提出的 SSL 模型方法, 评估 Cr(VI) 在土壤的淋溶释放, 基于《地下水质量标准》(GBT 14848—2017)<sup>[25]</sup> 反推得到我国 3 类典型土壤 Cr(VI) 的环境基准值, 进一步健全全国土壤环境治理和环境污染风险评价体系, 同时为制定地下水 Cr(VI) 污染修复方案提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土壤

本次研究选取了我国典型的 3 种土壤——壤质黏土、壤质砂土和黏壤土。分别取自吉林省农业科学院实验基地、江苏省泰州泰兴市、浙江省宁波鄞州区横溪镇甲村孟家埭的水田, 土壤均风干研磨过筛, 土壤基本性质见表 1。

表 1 试验土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of experimental soils

| 土壤     | 土壤化学性质 |                                      |  |                              |                                | 颗粒组成/%    |               |           |
|--------|--------|--------------------------------------|--|------------------------------|--------------------------------|-----------|---------------|-----------|
|        | pH     | 土壤有机质(SOM)<br>/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 阳离子交换量(CEC)<br>/(cmol·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 总无机碳<br>/(g·kg <sup>-1</sup> ) | >0.05~2mm | 0.05~0.002 mm | <0.002 mm |
| 吉林壤质黏土 | 7.62   | 30.33                                | 29.01                                    | 1.66                         | 1.01                           | 25.80     | 41.90         | 32.30     |
| 浙江黏壤土  | 5.40   | 79.40                                | 19.12                                    | 5.47                         | 0.71                           | 21.70     | 59.00         | 19.30     |
| 江苏壤质砂土 | 7.20   | 16.40                                | 9.30                                     | 1.01                         | 1.05                           | 53.80     | 34.50         | 11.70     |

### 1.2 分配系数

进行静态吸附试验, 分别称取 3 种土壤各 2.0 g, 将其置于离心管中。分别加入不同初始质量浓度的重铬酸钾溶液 20 mL(水土质量比为 10 : 1), 初始质量浓度设置为 5, 10, 20, 40, 50, 60, 80, 100 mg/L, 加 1~2 滴 200 mg/L 的氯化汞溶液抑制微生物生长, 加入浓度为 0.01 mol/L 的支持电解质硝酸钠溶液。恒温 25℃ 振荡 24 h 后静置 1 h, 振荡频率为 200 r/min。静置后取上清液于离心管中并离心 10 min, 离心机转速为 3 000 r/min, 离心后过 0.45 μm 滤膜, 静置后取上清液 1 mL, 置于 50 mL 比色管中, 将 0.5 mL 硫酸和 0.5 mL 磷酸混合后加入, 加二苯碳酰二肼显色剂 2 mL。通过分光光度计法测得 Cr(VI) 的质量浓度。每个试验样品设定 3 组平行试验。分配系数主要用来描述吸附特征。其表达公式为:

$$K_d = \frac{V(\rho_0 - \rho_e)}{m\rho_e} \quad (1)$$

式中:  $K_d$ ——分配系数/(L·kg<sup>-1</sup>);

$\rho_0$ ——初始配制液质量浓度/(mg·L<sup>-1</sup>);

$\rho_e$ ——平衡时配制液质量浓度/(mg·L<sup>-1</sup>);

$m$ ——试样土壤质量/g;

$V$ ——配制液体积/mL。

### 1.3 土壤/水分配方程

本次研究将《地下水质量标准》(GBT 14848—2017)<sup>[25]</sup> 中关于地下水 Cr(VI) 的限量值作为地下水安全前提下的最大重金属污染物浓度, 对土壤 Cr(VI) 环境基准值进行反推。研究通过 Freundlich 吸附等温方程模拟 Cr(VI) 淋溶液在土壤、土壤水和土壤空气 3 相的分配过程。假定吸附的过程为线性吸附<sup>[26]</sup>, 则土壤中 Cr(VI) 淋溶液的质量浓度为:

$$\rho_w = \frac{\rho_s \omega_s}{\theta_w + K_d \rho_b + H\theta_a} \quad (2)$$

式中:  $\rho_w$ ——Cr(VI) 淋溶液的质量浓度/(mg·L<sup>-1</sup>);

$\omega_s$ ——土壤 Cr(VI) 的质量分数/(mg·kg<sup>-1</sup>);

$\rho_b$ ——土壤干容重/(kg·L<sup>-1</sup>);

$\theta_w$ ——含水孔隙度/%;

$\theta_a$ ——含空气孔隙度/%;

$H$ ——亨利系数。

因本次研究的对象为重金属, 因此其  $H=0$ , 则土壤中 Cr(VI) 的质量分数为:

$$\omega_s = \rho_w \left( K_d + \frac{\theta_w}{\rho_b} \right) \quad (3)$$

#### 1.4 稀释系数

重金属污染液向下运移至地下水时,土壤对下渗的重金属污染液进行吸附转化,使得重金属污染液的浓度降低。该过程用稀释衰减系数(dilution attenuation factor, DAF)进行描述,但由于 SSL 模型不考虑污染物在土壤的吸附衰减过程,只关注了污染物在地下水中的稀释过程,因此本次研究采用稀释系数(dilution factor, DF)来描述污染物的纵向运移过程,其定义为土壤中污染液的质量浓度与污染物在地下水中的质量浓度的比值,即  $I_{DF} = \rho_w / \rho_{gw}$ 。根据 SSL 模型,稀释系数的计算方式为:

$$I_{DF} = 1 + Kid/IL \quad (4)$$

$$d = (0.011 2L^2)^{0.5} + d_a \left[ 1 - e^{-\frac{IL}{Kid_a}} \right] \quad (5)$$

式中:  $I_{DF}$ ——稀释系数;

$\rho_{gw}$ ——地下水中 Cr(VI) 的质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );

$d$ ——地下水混合区深度/m;

$K$ ——水力传导系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ );

$L$ ——污染场地长度/m;

$I$ ——下渗速率/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ );

$i$ ——水力梯度;

$d_a$ ——含水层厚度/m,当  $d > d_a$  时,  $d \approx d_a$ 。

#### 1.5 基准值推导

本次研究以保护地下水为目标,因此地下水中 Cr(VI) 质量浓度的最大值即为地下水 Cr(VI) 的限量值。此时土壤中 Cr(VI) 的质量分数即为土壤 Cr(VI) 环境基准值。采取《地下水质量标准》(GBT 14848—2017)<sup>[25]</sup> 中第 IV 类地下水质量分类的指标赋值于限量值并以此反推土壤环境基准值。因此环境基准值的公式为:

$$\rho_s = I_{DF} \left( K_d + \frac{\theta_w}{\rho_b} \right) \rho_m \quad (6)$$

式中:  $\rho_m$ ——地下水 Cr(VI) 限量值/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。

#### 1.6 其他参数

以保护地下水安全为目标的土壤环境基准值的计算过程需要土壤参数和含水层参数,本研究通过文献调研获得 3 种土壤相应的参数,由于调研所得参数量较大,取平均值赋值,具体见表 2。

表 2 3 种土壤及相应含水层特征参数调研统计结果

Table 2 Statistical results of three soils and corresponding aquifers parameters

| 土壤类型   | 统计值   | 土壤干容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 含水孔隙度/%      | 渗透速率/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 水力传导系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 数据来源        |
|--------|-------|---|--------------|---|---|-------------|
| 吉林壤质黏土 | 数据量/个 | 53  | 31           | 6                                       | 15  | 参考文献[27—35] |
|        | 范围    | 0.780 ~ 1.520                             | 28.5 ~ 53.53 | 0.461 ~ 0.979                           | 0.140 ~ 0.789                             |             |
|        | 平均值   | 1.331                                     | 43.9         | 0.648                                   | 0.523                                     |             |
| 浙江黏壤土  | 数据量/个 | 41  | 27           | 11                                      | 26  | 参考文献[36—44] |
|        | 范围    | 0.770 ~ 2.740                             | 29.7 ~ 58.5  | 0.036 ~ 1.440                           | 0.230 ~ 0.810                             |             |
|        | 平均值   | 1.927                                     | 35.8         | 0.432                                   | 0.640                                     |             |
| 江苏壤质砂土 | 数据量/个 | 51  | 51           | 21                                      | 21  | 参考文献[45—49] |
|        | 范围    | 2.650 ~ 2.720                             | 21.5 ~ 48.5  | 0.052 ~ 1.620                           | 0.220 ~ 0.674                             |             |
|        | 平均值   | 2.666                                     | 29.4         | 0.570                                   | 0.562                                     |             |

对于含水层厚度、污染场地长度和水力梯度,由于国内暂无全面、权威数据库,可参考的数据来源有限,因此引用《建设用地土壤污染风险评估技术导则》

(HJ 25.3—2019)<sup>[50]</sup> 推荐的参数赋值。本次研究推导 3 种土壤的 Cr(VI) 环境基准值所采用的参数见表 3。

表 3 3 种土壤水文地质参数及其他参数取值

Table 3 Values of soil hydrogeological parameters and other parameters of three soils

| 土壤     | 土壤干容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 含水孔隙度/% | 渗透速率/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 水力传导系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 含水层厚度/m | 沿污染源长度/m | 水力梯度 | 地下水限量值/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |
|--------|---|---------|---|---|---------|----------|------|--|
| 吉林壤质黏土 | 1.331                                     | 43.9    | 0.648                                   | 0.523                                     |         |          |      |  |
| 浙江黏壤土  | 1.927                                     | 35.8    | 0.432                                   | 0.640                                     | 2       | 40       | 1    | 0.1  |
| 江苏壤质砂土 | 2.666                                     | 29.4    | 0.570                                   | 0.562                                     |         |          |      |  |

## 2 结果

将静态吸附试验结果绘图,见图 1。吸附平衡时,

分配系数随着初始 Cr(VI) 质量浓度的增大而减小。当初始 Cr(VI) 质量浓度较低时, Cr(VI) 在土壤中的吸附逐渐饱和,当初始 Cr(VI) 质量浓度大于 60  $\text{mg/L}$  时,

分配系数曲线逐渐平衡。因此选取初始 Cr(VI) 质量浓度为 5~60 mg/L 来计算分配系数的区域平均值<sup>[51]</sup>。所得分配系数为浙江黏壤土(7.48 L/kg)>江苏壤质砂土(5.87 L/kg)>吉林壤质黏土(4.24 L/kg)。

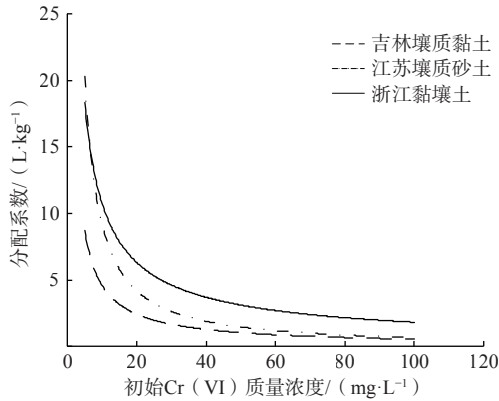


图 1 3 种土壤的 Cr(VI) 分配系数变化

Fig. 1 Variation of Cr(VI) distribution coefficient of three soils

根据公式(4)~(6)及表 3 的参数值,运用 SSL 模型对基于地下水安全的土壤 Cr(VI) 环境基准值进行关键参数的计算,得到 Cr(VI) 在 3 种土壤中的环境基准值,表现为浙江黏壤土(0.944 mg/kg)>江苏壤质砂土(0.690 mg/kg)>吉林壤质黏土(0.514 mg/kg)。计算结果见表 4。

表 4 3 种试验土壤的关键参数计算

Table 4 Calculation of key parameters of three test soils

| 土壤类型   | 稀释系数  | 分配系数<br>(L·kg <sup>-1</sup> ) | 土壤 Cr 环境基准值<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|--------|-------|-------------------------------|---------------------------------------|
| 吉林壤质黏土 | 1.126 | 4.24                          | 0.514                                 |
| 浙江黏壤土  | 1.231 | 7.48                          | 0.944                                 |
| 江苏壤质砂土 | 1.154 | 5.87                          | 0.690                                 |

### 3 讨论

#### 3.1 参数敏感性分析

根据 SSL 模型对基于地下水安全的土壤 Cr(VI) 环境基准值进行参数敏感性分析,以浙江黏壤土为例,见图 2。由图可知含水孔隙度和土壤干容重赋值的变化不会引起环境基准值的大幅变化,但分配系数和稀释系数的变化对环境基准值都有较为显著的影响。因此分别对分配系数和稀释系数进行分析。

##### 3.1.1 土壤参数对环境基准值的影响

本次研究获得的 3 种土壤分配系数表现为浙江黏壤土(7.48 L/kg)>江苏壤质砂土(5.87 L/kg)>吉林壤质黏土(4.24 L/kg),即表明浙江黏壤土相较于江苏壤质砂土和吉林壤质黏土对 Cr(VI) 有着更好的吸附能力。

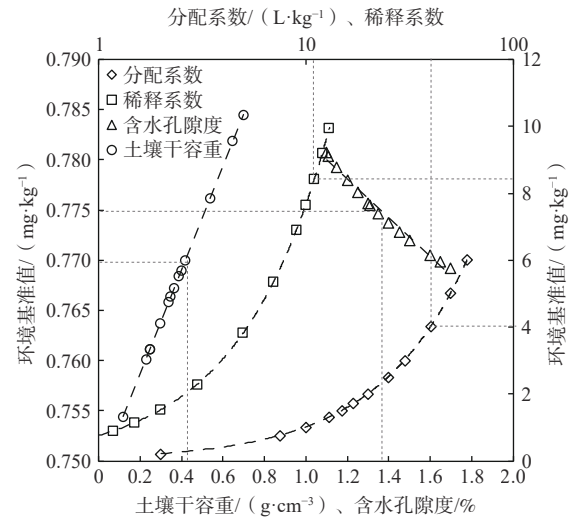


图 2 SSL 模型各参数取不同值时 Cr(VI) 土壤环境基准值变化

Fig. 2 Variation of Cr(VI) soil environmental criteria when parameters of SSL model are set to different values

而 3 种试验土壤 Cr(VI) 的分配系数与各自土壤 pH 值的关系也符合国内对 Cr(VI) 分配系数影响参数的研究结果,相关研究表明影响土壤分配系数的主要参数为 pH、CEC 和 SOM 等土壤性质参数<sup>[52]</sup>。其中关键影响参数为土壤 pH 值,其主要影响 Cr(VI) 的离子形态和吸附土壤表面的电荷数量。铬酸根等离子是土壤中 Cr(VI) 主要的存在形式,当 pH 值逐渐降低,土壤表面的正电荷会随着 OH<sup>-</sup> 的减少而增加,此时土壤对 Cr(VI) 的吸附能力增强<sup>[53]</sup>。本次研究的浙江黏壤土 pH(5.40)<江苏壤质砂土 pH(7.20)<吉林壤质黏土 pH(7.62)。浙江黏壤土对 Cr(VI) 的吸附能力大于另外 2 种土壤,即浙江黏壤土的分配系数大于另外 2 种土壤。除 pH 以外,黏壤土的有机质含量远高于壤质砂土和壤质黏土,也是导致其分配系数相较于壤质砂土和壤质黏土更高的重要原因。在相同 Cr(VI) 浓度的情况下,通过浙江黏壤土淋溶至地下水的 Cr(VI) 污染液少于另外 2 种土壤,对地下水的污染风险最小。因此 3 种土壤的 Cr(VI) 环境基准值为浙江黏壤土(0.944 mg/kg)>江苏壤质砂土(0.690 mg/kg)>吉林壤质黏土(0.514 mg/kg),浙江黏壤土的环境基准值最大。这也进一步表明研究区的土壤 pH 会对其吸附能力造成影响,进而影响土壤分配系数的大小,最终影响环境基准值的大小。我国土壤资源十分丰富,因此同一区域内土壤性质并不完全相同,要充分关注土壤差异性对土壤环境基准值带来的变化,应当健全分区土壤环境基准值标准体系。

##### 3.1.2 国内外土壤稀释系数的取值比较

本次研究是通过美国 EPA 的 SSL 模型得到基于

地下水安全的土壤 Cr(VI) 环境基准值, 其中稀释系数的取值变化对环境基准值也有较显著影响。因此整理了美国各州关于稀释系数的取值和基于保护地下水的土壤重金属 Cr(VI) 环境基准值, 并与本次研究所采用的稀释系数取值和计算所得的环境基准值进行比较。结果见表 5。

表 5 与美国各州基于地下水安全的土壤环境基准值的比较  
Table 5 Comparison with soil environment criteria based on groundwater safety in US states

| 研究地区及指标     | 稀释系数            | 基准值<br>/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 数据来源     |
|-------------|-----------------|--------------------------------|----------|
| 美国          | EPA: 通用土壤筛选值    | 20                             | 38       |
|             |                 | 1                              | 2        |
|             | 纽约州: 土壤清理目标     | 100                            | 19       |
|             | 马里兰州: 保护地下水土壤标准 | —                              | 0.013    |
|             | 佛罗里达州: 清理目标等级   | 20                             | 4.2      |
| 新泽西州: 修复目标值 | 1               | 1.6                            | 参考文献[58] |
| 中国          | 吉林壤质黏土          | 1.126                          | 0.514    |
|             | 浙江黏壤土           | 1.231                          | 0.944    |
|             | 江苏壤质砂土          | 1.154                          | 0.690    |

注: 表中“—”为数据缺失。

由表 5 可得美国 EPA 制定的 Cr(VI) 环境基准值与各州根据本地实际情况所制定的环境基准值都是基于地下水安全不受到土壤 Cr(VI) 淋溶液的影响来进行推导, 但各个标准的基准值有较大差异。主要是参数稀释系数的差异所导致, 因土壤和含水层类型的不同, 美国政府和各州都分别制定了符合实际情况的稀释系数。其中美国 EPA 规定绝大多数情况下, 当研究场地面积 < 2023.43 m<sup>2</sup> 时稀释系数取值为 20, 当研究场地的面积 > 2023.43 m<sup>2</sup> 或者研究场地存在裂隙分布从而导致地下水埋深十分浅时稀释系数取值为 1。本次研究采用美国 EPA 提供的稀释系数计算公式进行稀释系数的推导, 所得稀释系数与美国 EPA 的通用土壤筛选值的第二类赋值相近。本次研究所得的基准值也与美国 EPA 制定的稀释系数为 1 时的基准值较为接近。根据 SSL 模型可知, 随着水力传导系数的增加, 稀释系数也逐渐增加, 二者呈正相关, 而基于地下水安全的土壤 Cr(VI) 环境基准值也与稀释系数呈正相关。本研究中水力传导系数表现为浙江黏壤土 (0.640 m/d) > 江苏壤质砂土 (0.562 m/d) > 吉林壤质黏土 (0.523 m/d), 浙江黏壤土的水力传导系数大于另外 2 种土壤。则稀释系数表现为浙江黏壤土 (1.231) > 江苏壤质砂土 (1.154) > 吉林壤质黏土 (1.126)。因此 Cr(VI) 在 3 种土壤环境基准值的表现表现为浙江黏壤土 (0.944 mg/kg) > 江苏壤质砂土 (0.690 mg/kg) > 吉林壤质

黏土 (0.514 mg/kg), 浙江黏壤土的环境基准值最大。另外, 这也进一步表明研究区的土壤含水层性质会对其稀释系数造成影响, 最终影响土壤环境基准值的大小。但该模型方法并未考虑淋溶液中 Cr(VI) 在包气带的衰减过程, 因此所求得的稀释系数与实际的稀释衰减系数相比而言较小, 因此本研究所推导出的 Cr(VI) 环境基准值相对保守, 可结合 Hydrus 等地下水污染物运移模拟软件精确刻画 Cr(VI) 在含水层中的实际运移过程并对稀释系数进行修正, 使得 Cr(VI) 的环境基准值更为可靠。

综上可知, 土壤含水层参数的取值对于计算土壤环境基准值有很大的影响, 整理的国外标准都会指出各类参数的取值范围与依据, 但我国土壤污染风险评估标准中对土壤和水文地质参数的资料收集还较为匮乏, 并且由于我国南北方土壤差异性较大, 难以统一土壤和水文地质参数。因此应当建立适合我国各地土壤环境基准值研究的参数数据库, 为我国的土壤污染风险评估提供有力的数据支撑。

### 3.2 与建设用地土壤污染管控标准的比较

近年来, 我国为加强土壤环境监管, 保障人民居住环境安全, 颁布了《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)<sup>[17]</sup> 和《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)<sup>[18]</sup>。其中农用地标准中所涉及的重金属污染物项目均按元素总量计, 无法与本次所研究的 Cr(VI) 环境基准值进行比较。因此本文仅整理了我国建设用地标准中关于土壤 Cr(VI) 的各类阈值, 并与本次研究所得基于地下水安全的环境基准值进行比较, 为我国土壤环境综合治理工作提供参考, 结果见表 6。

表 6 本研究与《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)<sup>[17]</sup> 关于 Cr(VI) 阈值的比较  
Table 6 Comparison of Cr(VI) threshold between this study and soil environmental quality-risk control standard for soil contamination of development land (GB 36600—2018)<sup>[17]</sup>

| 指标        | Cr(VI) 阈值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |       |
|-----------|----------------------------------|-------|
| 建设用地土壤筛选值 | 第一类用地                            | 3.000 |
|           | 第二类用地                            | 5.700 |
| 建设用地土壤管制值 | 第一类用地                            | 30    |
|           | 第二类用地                            | 78    |
| 本研究       | 吉林壤质黏土                           | 0.514 |
|           | 浙江黏壤土                            | 0.944 |
|           | 江苏壤质砂土                           | 0.690 |

本研究的目的是推导基于地下水安全的土壤环境基准值, 所计算的土壤环境基准值小于建设用地土

壤标准中所提出的土壤污染阈值。因为地下水污染监管治理难,其清洁周期较地表污染更长,所以对地下水的污染风险管控应当更为重视,对基于地下水安全的土壤重金属管控标准制定应当更加严格,以保护地下水安全为目标的土壤环境基准值相较建设用地土壤污染管控的标准制定也应更为严格苛刻。

### 3.3 地下水污染限量值的选择

本研究 SSL 模型中的地下水重金属污染限量值取自我国颁布的《地下水质量标准》(GB 14848—2017)<sup>[25]</sup>,该标准根据我国的地下水质量状况和人体健康风险情况对地下水组分浓度高低进行划分。其中Ⅲ类地下水用于生活饮用和工农业用水;第Ⅳ类地下水适当处理后可以作为生活用水。而我国颁布的《生活饮用水标准》(GB 5749—2006)<sup>[59]</sup>中对于生活饮用水水质卫生常规指标也做出了要求,因此整理了 2 个标准的指标进行比较,见表 7。

表 7 《地下水质量标准》(GB 14848—2017)<sup>[25]</sup>与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)<sup>[59]</sup>中 Cr(VI) 指标的比较  
Table 7 Comparison of Cr(VI) index between standard for groundwater quality (GB 14848—2017)<sup>[25]</sup> and standard for drinking water quality (GB 5749—2006)<sup>[59]</sup>

| 标准  | Cr(VI)质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) |       |       |       |       |
|---|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|   | I类                               | II类   | III类  | IV类   | V类    |
| 《地下水质量标准》<br>(GB 14848—2017) <sup>[25]</sup>  | ≤0.005                           | ≤0.01 | ≤0.05 | ≤0.10 | >0.10 |
| 《生活饮用水卫生标准》<br>(GB 5749—2006) <sup>[59]</sup> |                                  |       | 0.05  |       |       |

本次研究的目的是完善我国土壤环境质量评价体系,获得基于地下水安全的 Cr(VI) 土壤环境基准值。参照地下水质量标准中的Ⅳ类地下水质量分类的指标,对 SSL 模型中的 Cr(VI) 限量值赋值,以确保计算的环境基准值不会过于保守(表 8)。但考虑我国部分城市的饮用水源包括地下水供给,尤其北方城市将地下水作为主要生活用水和工农业用水,为了确保

表 8 3 种试验土壤在 2 种限量值情况下土壤 Cr(VI) 环境基准值计算

Table 8 Calculation of soil environment criteria for three test soils under two limited values

| 土壤类型   | 分类 | 地下水Cr(VI)污染<br>限量值/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 土壤Cr(VI)环境<br>基准值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|--------|----|--|--|
| 吉林壤质黏土 | Ⅳ类 | 0.10                                     | 0.514                                    |
|        | Ⅲ类 | 0.05                                     | 0.257                                    |
| 浙江黏壤土  | Ⅳ类 | 0.10                                     | 0.944                                    |
|        | Ⅲ类 | 0.05                                     | 0.472                                    |
| 江苏壤质砂土 | Ⅳ类 | 0.10                                     | 0.690                                    |
|        | Ⅲ类 | 0.05                                     | 0.345                                    |

当地居民用水的健康安全,地下水应满足我国生活饮用水标准。Cr(VI) 在生活饮用水中的标准值与Ⅲ类地下水质量标准相同,因此北方地区环境基准值计算模型中的地下水 Cr(VI) 污染限量值应取更为严苛的Ⅲ类地下水质量分类的指标值,通过该指标值赋值限量值并反推出的环境基准值更加贴近当地实际情况。将Ⅲ类地下水质量中 Cr(VI) 指标值赋值带入模型求解计算基于地下水安全的 Cr(VI) 土壤环境基准值,计算结果见表 8。

由表 8 可得,当选取要求为更严格的第Ⅲ类地下水质量指标时,计算所得的基于地下水安全的土壤 Cr(VI) 环境基准值降低,因此以地下水为主要生活用水的地区应当采取更为严格的土壤管控措施以保护当地地下水不受污染,有针对性的制定基于地下水安全的土壤环境基准值和最佳污染应对管理策略,有效防止污染,降低风险,为当地人民群众的生命健康和土壤生态环境保护提供技术和法规支持。

## 4 结论

(1)通过静态吸附试验获得了 3 种试验土壤的分配系数,通过文献调研获得土壤和水文地质参数并据此计算了 3 种试验土壤的稀释系数,采用美国 EPA 所提出的 SSL 模型,基于《地下水质量标准》(GB 14848—2017)<sup>[25]</sup>中地下水的 Cr(VI) 污染限量值反推得到 3 种试验土壤以地下水安全为目标的 Cr(VI) 土壤环境基准值,分别为浙江黏壤土 0.944 mg/kg、江苏壤质砂土 0.690 mg/kg、吉林壤质黏土 0.514 mg/kg。

(2)本研究推导的基于地下水安全的土壤 Cr(VI) 环境基准值与美国以保护地下水安全为目标的通用基准值 2 mg/kg 较为接近,但各研究地区土壤性质的差异使得最终的基准数值有所差别。由于本研究查阅收集的土壤参数有限,同时土壤本身存在一定的非均质性,所以需进一步细化各地实际的土壤和水文地质参数等相关资料,得到更为准确的土壤环境基准值,更好的为政府管理部门提供参考依据。

(3)《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)<sup>[17]</sup>关于 Cr(VI) 的土壤筛选值为:第一类用地 3.000 mg/kg,第二类用地 5.700 mg/kg。与本研究推导的基于地下水安全的土壤 Cr(VI) 环境基准值相比数值偏高,因为建设用地土壤污染风险管控标准主要用于建设用地的土壤污染管理,相对而言地下水污染更难治理,基于地下水安全的土壤重金属管控标准制定应当更加严格。在制定土壤质量标准



时应充分考虑到地下水安全的因素,在此基础上设定的土壤安全阈值才会更为准确。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] XIAO Wendan, ZHANG Yibin, LI Tingqiang, et al. Reduction kinetics of hexavalent chromium in soils and its correlation with soil properties[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(5): 1452 – 1458.
- [ 2 ] ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, LIU Lei, et al. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China[J]. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0135182.
- [ 3 ] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤状况调查公报 [R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部, 2014. [ Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. National soil status survey bulletin[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2014. (in Chinese) ]
- [ 4 ] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 409 – 417. [ HUANG Yizong, HAO Xiaowei, LEI Ming, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 409 – 417. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 周启星, 安婧, 何康信. 我国土壤环境基准研究与展望 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(1): 1 – 6. [ ZHOU Qixing, AN Jing, HE Kangxin. Research and prospect on soil-environmental criteria in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1): 1 – 6. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] WOOD G. Thresholds and criteria for evaluating and communicating impact significance in environmental statements: 'See no evil, hear no evil, speak no evil' [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2008, 28(1): 22 – 38.
- [ 7 ] BHATTACHARYA R N, PAL R. Environmental standards as strategic outcomes: A simple model[J]. *Resource and Energy Economics*, 2010, 32(3): 408 – 420.
- [ 8 ] US EPA. Soil screening guidance: User's guide[R]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996.
- [ 9 ] CCME. Remediation objectives for contaminated sites in Canada[R]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1996.
- [ 10 ] CAVANAGH L. Comparison of soil guideline values used in New Zealand and their derivations[R]. New Zealand: Landcare Research Contract Report, 2006.
- [ 11 ] DEFRA, Environment Agency. CLR 10 SGV10: Soil guideline values for lead contamination[R]. Swindon: The R & D Dissemination Centre, 2002.
- [ 12 ] DEFRA, Environment Agency. The contaminated land exposure assessment (CLEA) model: Technical basis and algorithms[R]. London: Environment Agency, 2002.
- [ 13 ] 中华人民共和国环境保护部. 污染场地风险评估技术导则: HJ 25.3—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014. [ Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites: HJ 25.3—2014[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014. (in Chinese) ]
- [ 14 ] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准: GB 15618—1995 [S]. 1995. [ State Bureau of Environment Protection. Environmental quality standard for soils: GB 15618—1995[S]. 1995. (in Chinese) ]
- [ 15 ] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准: GB 36600—2018 [S]. 2018. [ Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of development land: GB 36600—2018[S]. 2018. (in Chinese) ]
- [ 16 ] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018[S]. 2018. [ Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018[S]. 2018. (in Chinese) ]
- [ 17 ] MITCHELL R G, SPLIETHOFF H M, RIBAUDO L N, et al. Lead (Pb) and other metals in New York City community garden soils factors influencing contaminant distributions[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 187: 162 – 169.
- [ 18 ] 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 等. 重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导 [J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 5264 – 5274. [ MA Jie, SHE Zelei, WANG Shenglan, et al. Health risk assessment and

- environmental benchmark of cadmium in farmland soils around the gangue heap of coal mine, *Chongqing*[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 5264 – 5274. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 于蕾. 山东省土壤重金属环境基准及标准体系研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2015. [ YU Lei. Study on environmental benchmark and standard system of soil heavy metals in Shandong Province[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] RÖMKENS P F A M , BRUS D J, GUO H Y , et al. Impact of model uncertainty on soil quality standards for cadmium in rice paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(17): 3098 – 3105.
- [21] BRUS D J , DE GRUIJTER J J, WALVOORT D J J , et al. Mapping the probability of exceeding critical thresholds for cadmium concentrations in soils in the Netherlands[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6): 1875 – 1884.
- [22] 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 等. 重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准 [J]. *环境科学*, 2014, 35(8): 3155 – 3161. [ WANG Xiaonan, LIU Zhengtao, WANG Wanhua, et al. Ecotoxicological effect and soil environmental criteria of the heavy metal chromium(VI) [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8): 3155 – 3161. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 王莹, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 成都平原农田区土壤重金属元素环境基准值初步研究 [J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 953 – 962. [ WANG Ying, HOU Qingye, YANG Zhongfang, et al. Study on environmental criteria for heavy metal of farmland soil in Chengdu plain[J]. *Geoscience*, 2012, 26(5): 953 – 962. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 梁捷. 海南省典型作物系统中砖红壤的环境基准值及环境容量研究 [D]. 海口: 海南大学, 2020. [ LIANG Jie. Study on environmental standard value and environmental capacity of brick red soil in typical crop system of Hainan Province[D]. Haikou: Hainan University, 2020. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T14848—2017[S]. 2017. [ General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for groundwater quality: GB/T 14848—2017[S]. 2017. (in Chinese) ]
- [26] 近藤精一, 石川达雄, 安部郁夫. 吸附科学 [M]. 李国希, 译. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2006, 37 – 38. [ SEICHI K, TATSUO I, IKUO A. Adsorption science [M]. LI Guoxi, trans. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 37 – 38. (in Chinese) ]
- [27] 田野宏, 屈远强, 满秀玲, 等. 水土保持措施对黑土流失区土壤理化性质的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(11): 84 – 88. [ TIAN Yehong, QU Yuanqiang, MAN Xiuling, et al. Effect of soil and water conservation measures on physical and chemical properties of black soil erosion area[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(11): 84 – 88. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 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. [ LYU Junjia, XU Duanping, LI Fasheng. 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 孟凯, 张兴义, 随跃宇, 等. 黑龙江海伦农田黑土水分特征 [J]. *土壤通报*, 2003, 34(1): 11 – 14. [ MENG Kai, ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, et al. Black soil water characteristic in Hailun, Heilongjiang[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1): 11 – 14. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 段兴武, 赵振, 刘刚. 东北典型黑土区土壤理化性质的变化特征 [J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 529 – 534. [ DUAN Xingwu, ZHAO Zhen, LIU Gang. The variations of soil physico-chemical properties since the second national soil survey in the northeast typical black soil regions[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 529 – 534. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 陈社明. 吉林西部浅层地下水系统对旱改水工程的响应研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013. [ CHEN Sheming. Response of shallow groundwater system to dryland changed into paddy field project in western of Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] 王甜甜. 吉林省中部地下水污染风险评估 [D]. 长春: 吉林大学, 2011. [ WANG Tiantian. Risk assessment of groundwater pollution in middle Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 崔丽娟, 赵欣胜, 李伟, 等. 基于土壤渗透系数的吉林

- 省湿地补给地下水功能分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1457 - 1468. [ CUI Lijuan, ZHAO Xinsheng, LI Wei, et al. Analysis on groundwater supply function of wetlands in Jilin Province based on soil permeability coefficient[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1457 - 1468. (in Chinese with English abstract) ]
- [34] 胡业殊, 刘艇, 王继红. 东北黑土“土壤水库”特征及渗透速率研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(21): 12765 - 12767. [ HU Yeshu, LIU Ting, WANG Jihong. Studies on the characteristics and permeation speed of soil reservoir in northeast black soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(21): 12765 - 12767. (in Chinese with English abstract) ]
- [35] 张玉, 张朝, 王世杰, 等. 黑土不同粒径有机-矿质复合体对镉的吸附特性[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(4): 447 - 452. [ ZHANG Yu, ZHANG Chao, WANG Shijie, et al. Adsorption characteristics of cadmium on particle-sized aggregates from black soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(4): 447 - 452. (in Chinese with English abstract) ]
- [36] 陈旭彤. 杭州城市绿地土壤肥力质量评价[J]. *贵州农业科学*, 2012, 40(11): 148 - 150. [ CHEN Xutong. Soil fertility quality assessment for urban green space in Hangzhou City[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, 40(11): 148 - 150. (in Chinese with English abstract) ]
- [37] 林政. 软土的固结和渗透特性原位测试理论研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. [ LIN Zheng. Study on in-situ measurement of soil consolidation and permeability characteristics and its applications[D]. Hangzhou: ZheJiang University, 2005. (in Chinese with English abstract) ]
- [38] 逮武全. 杭州地区软土渗透特性研究[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2017. [ LU Wuquan. Study on permeability of soft soil in Hangzhou area[D]. Hangzhou: ZheJiang University of Science & Technology, 2017. (in Chinese with English abstract) ]
- [39] 杨淑贞, 马原, 蒋平, 等. 浙西天目山土壤理化性质的海拔梯度格局[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2009(6): 101 - 107. [ YANG Shuzhen, MA Yuan, JIANG Ping, et al. Soil physical and chemical properties along altitudes of western Tianmushan, Zhejiang[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2009(6): 101 - 107. (in Chinese with English abstract) ]
- [40] 钟继洪, 唐淑英, 谭军. 广东红壤类土壤结构特征及其影响因素[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(1): 61 - 65. [ ZHONG Jihong, TANG Shuying, TAN Jun. Structure characteristics of red soils and their effective factors[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1): 61 - 65. (in Chinese with English abstract) ]
- [41] 潘云, 吕殿青. 土壤容重对土壤水分入渗特性影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(2): 59 - 61. [ PAN Yun, LYU Dianqin. Effects of soil bulk density on characteristics of soil infiltration[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(2): 59 - 61. (in Chinese with English abstract) ]
- [42] 方堃, 陈效民, 张佳宝, 等. 红壤地区典型农田土壤饱和和导水率及其影响因素研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(4): 67 - 69. [ FANG Kun, CHEN Xiaomin, ZHANG Jiabao, et al. Saturated hydraulic conductivity and its influential factors of typical farmland in red soil region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(4): 67 - 69. (in Chinese with English abstract) ]
- [43] 鲍文, 赖奕卡. 湘中红壤丘陵区不同土地利用类型对土壤特性的影响[J]. *中国水土保持*, 2011(10): 47 - 50. [ BAO Wen, LAI Yika. Influence of different land uses to soil properties in red soil hilly region of central Hu'nan[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2011(10): 47 - 50. (in Chinese with English abstract) ]
- [44] 曾健, 费良军, 裴青宝. 土壤容重对红壤水分垂直入渗特性的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(12): 1081 - 1087. [ ZENG Jian, FEI Liangjun, PEI Qingbao. Influence of soil bulk density on soil water infiltration characteristics in water vertical movement for red loams[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 35(12): 1081 - 1087. (in Chinese with English abstract) ]
- [45] 夏继宗, 奚赛英, 尤迪, 等. 常州地区含水层渗透系数与特征粒径的相关性研究[J]. *城市地质*, 2015, 10(2): 24 - 26. [ XIA Jizong, XI Saiying, YOU Di, et al. Study on correlation between characteristic grain size and permeability coefficient in Changzhou[J]. *Urban Geology*, 2015, 10(2): 24 - 26. (in Chinese with English abstract) ]
- [46] 李冬林, 韩丽, 阮宏华, 等. 秦淮河河岸带土壤理化性质分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(4): 17 - 22. [ LI Donglin, HAN Li, RUAN Honghua, et al. Analysis of soil physical and chemical properties of riparian zone along Qinhuai River[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2008, 32(4): 17 - 22. (in Chinese with English abstract) ]

- abstract) ]
- [47] 王琪琪, 濮励杰, 朱明, 等. 沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究——以江苏省如东县为例 [J]. *地理科学*, 2016, 36(2): 256 – 264. [ WANG Qiqi, PU Lijie, ZHU Ming, et al. Soil quality evolution in coastal reclamation zones: A case study of Rudong County of Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 256 – 264. (in Chinese with English abstract) ]
- [48] 周忠胜, 张文豹, 曾雷, 等. 南京城市风景林凋落物现存量及其与土壤主要物理性质的关系 [J]. *江苏林业科技*, 2020, 47(5): 22 – 27. [ ZHOU Zhongsheng, ZHANG Wenbao, ZENG Lei, et al. Accumulation amount of litter and relationship with soil physical property in landscape forest in Nanjing[J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2020, 47(5): 22 – 27. (in Chinese with English abstract) ]
- [49] 胡超, 徐家明, 张沙沙, 等. 蒙特卡罗方法在灰岩岩溶裂隙含水层渗透系数估计中的应用 [J]. *江苏水利*, 2016, (5): 6 – 11. [ HU Chao, XU Jiaming, ZHANG Shasha, et al. Hydraulic conductivity estimation of limestone karst-fissure aquifer based on Monte Carlo method[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2016, (5): 6 – 11. (in Chinese with English abstract) ]
- [50] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤污染风险评估技术导则: HJ 25.3—2019[S]. 2019. [ Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for risk assessment of soil contamination of land for construction: HJ 25.3—2019[S]. 2019. (in Chinese) ]
- [51] 朱菲菲, 侯红, 赵龙, 等. 以保护地下水为目标的 Ag 土壤环境基准推导案例 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(12): 1556 – 1563. [ ZHU Feifei, HOU Hong, ZHAO Long, et al. Derivation of groundwater protection-based soil environmental criteria for silver: A case study [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(12): 1556 – 1563. (in Chinese with English abstract) ]
- [52] 张瑶. 典型土壤中 Cr(VI)的吸附与迁移特征研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017. [ ZHANG Yao. Study on adsorption and transportation of Cr(VI) in typical soils[D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing, 2017. (in Chinese with English abstract) ]
- [53] 李航彬. 铬渣中 Cr(VI)溶解释放及其在土壤中迁移规律研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011. [ LI Hangbin. Study on dissolution and release of Cr(VI) from chromium residue and its migration in soil[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese with English abstract) ]
- [54] US EPA. Regional screening level (RSL) soil to groundwater supporting table[R]. Washington DC: US EPA. 2009.
- [55] New York State Department of Environmental Conservation, New York State Department of Health. Development of soil cleanup objective technical support document[R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response. 2006.
- [56] Maryland Department of the Environment (MDE). Cleanup standards for soil and groundwater[R]. Maryland: State of Maryland Department of the Environment. 2008.
- [57] Center for Environmental & Human Toxicology University of Florida. Technical report: Development of cleanup target levels (CTLs) [R]. Gainesville: Department of Environmental Protection Public. 2005.
- [58] US EPA. Guidance for the determination of the dilution-attenuation factor for the impact to ground water pathway[R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response. 2008.
- [59] 中华人民共和国卫生部, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2006[S]. 2006. [ Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration. Standards for drinking water quality: GB 5749—2006[S]. 2006. (in Chinese) ]

编辑: 宗 爽