

地下水对土壤耕层的污染特性研究

孙可迪, 张燕, 奥岩松

(上海交通大学农业与生物学院, 上海 201101)

摘要: 通过模拟不同水位、污染度的地下水在不同质地土壤耕层中的迁移, 进行了地下水中盐分和重金属对土壤耕层污染规律的研究。结果表明, 不同水位、不同质地土壤中, 污染地下水在土壤中 EC 值的垂直分布规律相似, 土壤底层和表层 EC 值较高。轻质土耕层内 EC 值变幅较大; 水位越高, 耕层中 EC 值总体越小。地下水中 Na^+ 和 SO_4^{2-} 在土壤耕层中的分布以表层浓度较高, 其他层上浓度较低。 Cr^{6+} 在土壤表层分布浓度较高, Hg^{2+} 在近地表层浓度较高, 而 Pb^{2+} 在土层上的分布没有明显的规律。对单一离子来说, 随着地下水污染度的增加, 在某一土层上该离子的浓度也有所增大。

关键词: 地下水; 污染; 土壤耕层; 盐分; 重金属

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2004)03-0525-05

Pollution Characters of Contaminated Groundwater to Soil Pough Layer

SUN Ke-di, ZHANG Yan, AO Yan-song

(School of Agriculture & Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201101, China)

Abstract: By simulating the movement of groundwater in soil plough layer, the pollution characters of groundwater contaminated by salinity and heavy metals in the plough layer were researched under different water tables, different pollution levels and various texture soils. The vertical distribution of groundwater EC in soil showed similar under different water tables and texture soils, with higher values at the subsoil and topsoil, and changed much in light soil. The higher the water table, the lower the average EC in plough layer. Na^+ and SO_4^{2-} also showed similar distribution in soil, and with more amounts in topsoil than in others. The concentration of Cr^{6+} was higher in topsoil and Hg^{2+} in upper soil, but the distribution of Pb^{2+} in soil showed no apparent trend. The distribution of single ion in soil was consistent, and the content of each ion in one layer increased with the increasing pollution of groundwater.

Keywords: groundwater; pollution; plough layer; salinity; heavy metal

人为造成地下水污染的原因主要有生活污水、垃圾、工业废水、废渣、农药和化肥等, 而在引起地下水污染的非点源污染中最常见的形态即是盐分和硝酸盐的污染^[9]。从污染物迁移角度出发, 一个完整的地下水污染系统应由以下各单元组成: 污染源、耕作层、犁底层、下包气带、含水层及农作物^[11]。污染的地下水势必污染到耕作层土壤, 导致农作物的品质下降, 进而威胁到人类健康。

地下水中所含的溶质常通过毛细管随地下水上升进入土壤表层。毛细管水流的上升高度和速度决定

了土壤积盐的强度, 而地下水水位和土壤表层的水势梯度又是影响毛细管水流上升高度和速度的重要因素。有研究表明, 潜埋地下水对土壤水动态有很大影响, 而且根区分布深度内的土壤水分变化显著。同时, 土壤盐渍化程度与土质、蒸发时间和地下水矿化度也有密切的关系^[12]。由于土壤孔隙度、容水性和透水性等物理性状的不同, 地下水蒸发量大小依次为砂土、砂壤土、粘壤土和粘土^[13]。随着地下水蒸发时间的延长, 表土中的积盐量也不断增多^[14]。也有研究指出, 砂壤土耕层深度内的 EC 值与地下水矿化度呈显著的正相关^[15]。

本文在已有研究基础上, 从不同水位、污染度的地下水和质地不同的土壤几方面, 考察了地下水污染物在土壤中的迁移规律。从污染形态上着重考虑了重

收稿日期: 2003-10-21

基金项目: 上海市科技攻关重大项目(023912008)

作者简介: 孙可迪(1975—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生物化学与分子生物学。E-mail: skk628@163.com

联系人: 奥岩松

金属,通过提示地下水溶质在土壤中的迁移规律,以期为进行因地下水引起的土壤盐渍化和重金属污染的治理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

所用土壤取自上海交通大学农场。所用砂壤土、壤土和粘壤土在实验起始时取样,测定的理化性状结果见表1。

表1 供试土壤的理化性状

Table 1 The physical and chemical properties of experimental soil

性状	土壤类型		
	砂壤土	壤土	粘壤土
物理性状			
容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.36	1.28	1.12
总孔隙度/%	48.1	53.5	59.3
化学性状			
pH	6.47	6.45	6.48
EC/ $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$	0.47	0.55	0.62
有机质含量/%	1.71	1.82	2.06
$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	16.1	14.7	14.0
$\text{Na}^+/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	18.2	12.7	13.3
$\text{Hg}^{2+}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.000	0.000	0.000
$\text{Pb}^{2+}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.004	0.002	0.002
$\text{Cr}^{6+}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.007	0.009	0.010

1.2 试验设置

用无底无盖长40 cm、宽30 cm、高度分别为20, 30和40 cm的一组木箱,将破碎匀质化后的土壤分别装入箱中。静置5 d后进入实验阶段。

以配制好的特定浓度盐类和重金属的水源从箱体底部供给水分,模拟地下水位分别为距地表20, 30和40 cm时的情况。

1.3 试验方法

试验于2002年9月12日在上海交通大学农场进行。试验设置3个处理组,分别代表3种污染度的地下水,各组中的离子浓度如表2。当地下水已运行至土壤表面时进行第1次取样,24 h后再进行土壤取样。取样位点分别为距木箱底部0~2, 7~9, 14~16, 21~23 cm(地下水位距土壤表层20 cm时则为18~20 cm), 28~30和37~39 cm处的土层。

将取得的土样溶解、振荡、过滤后,收集水样用于测定pH值、EC值和 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{6+} 浓度,并根据土壤含水量和水样的离子浓度计算出土样中的 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{6+} 含量。

离子含量测定在IRIS Advantage 1000型电感耦

表2 处理组的主要离子和组成

Table 2 Main components of the treatment groups

溶质	处理中离子浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		
	I	II	III
SO_4^{2-}	350	700	1 400
Na^+	400	800	1 600
Hg^{2+}	0.001	0.002	0.004
Pb^{2+}	0.100	0.200	0.400
Cr^{6+}	0.100	0.200	0.400

合等离子发射光谱仪上进行。地下水运行过程中EC值、离子含量为24 h内前后两次取样的平均值。

2 结果分析

2.1 地下水在不同质地土壤耕层中上行时的EC值分布

以表2中处理组II的污染地下水,置于距地表30 cm水位下,测定在砂壤土、壤土和粘壤土上不同耕层土壤溶液中的EC值,同时以纯净水为对照,结果如图1所示。

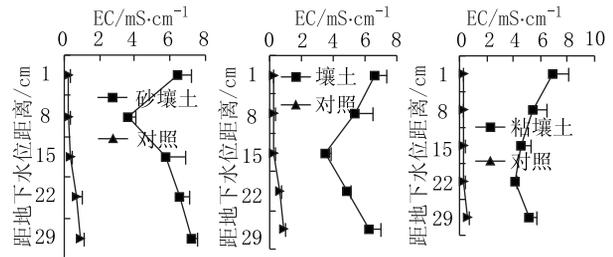


图1 地下水在3种土壤不同耕层的EC值比较

Figure 1 Comparisons of groundwater EC in different plough layers of three types of soil

结果表明,地下水在不同质地土壤耕层中上行时的EC值分布规律基本相似,其共同特点是,土壤近地下水位的底层和土壤表层处的EC值较高,而在其他土层EC值则较低。对于不同质地的土壤,其水分EC值的最低分布层间有着较大的差异,在3种质地的土壤中,随着土壤质地由轻变重,地下水上行时EC值分布的最低值有随近底层向土壤表层移动的规律,砂壤土、壤土和粘壤土分别出现在8, 15和22 cm。而且在轻质土耕层内的水分EC的变幅很大,反之亦然。

2.2 不同水位地下水在壤土耕层中上行时的EC值分布

将处理组II的污染地下水,分别置于距地表20, 30和40 cm水位下,比较地下水在壤土耕层中EC值的分布,结果如图2。

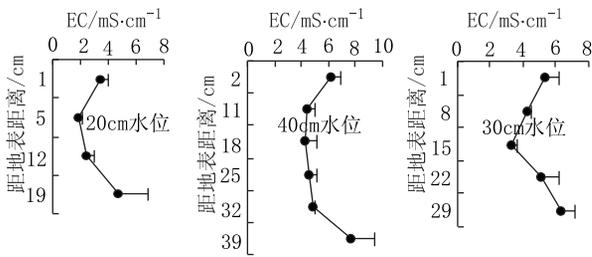


图 2 3 种水位地下水在不同土壤耕层的 EC 值比较

Figure 2 Comparison of groundwater EC under different water tables in plough layers

无论水位高低, 耕层中水分 EC 值的垂直分布表现出类似的规律。而水位越高, 土壤耕层中水分的 EC 值总体要小得多。

2.3 地下水中 Na⁺, Pb²⁺, Hg²⁺, Cr⁶⁺ 和 SO₄²⁻ 在壤土不同耕层中的分布

以 II 组污染度的地下水, 置于距地表 30 cm 的水位下, 其上行时 Na⁺, Pb²⁺, Hg²⁺, Cr⁶⁺ 和 SO₄²⁻ 在各土层中的分布结果如图 3 如示。

Na⁺ 在壤土各土层上的分布呈波形曲线, 在距地下水水位距离 1 和 15 cm 处, 浓度较低, 而在土壤表层

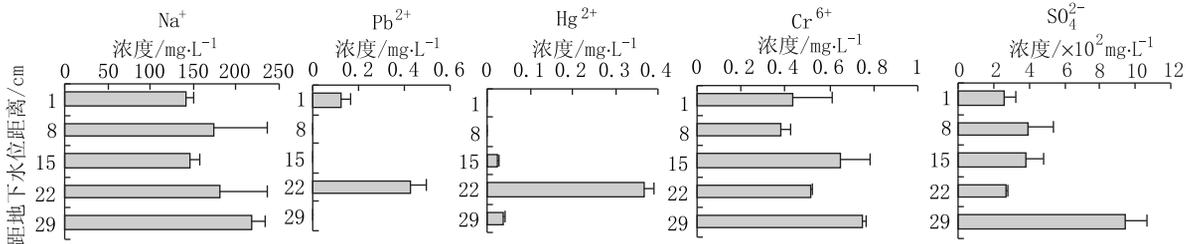


图 3 地下水中各离子在不同土壤耕层中的分布

Figure 3 Distribution of groundwater ions in the different soil plough layers

表 3 不同污染度地下水在土壤耕层中的 EC 值(mS · cm⁻¹)
Table 3 EC values of the groundwater with different pollution degrees in soil plough layers (mS · cm⁻¹)

污染度	距地下水水位距离/cm				
	1	8	15	22	29
对照	0.31	0.35	0.33	0.58	0.86
I	3.68	2.67	3.62	3.38	3.71
II	6.32	5.12	3.34	4.32	5.51
III	7.59	4.77	4.71	4.91	8.18

匀的。不同污染度的污染地下水经上行时在各土层中的分布规律完全一致, 其 EC 最低值分别在 I、II 和 III 组的处理上出现在距地下水水位 8, 15 和 15 cm 处。对于同一土层来说, 地下水污染程度越重, 上行后滞留在该层的污染物 EC 值也越高。

不同污染度地下水上行时, 其中的 Na⁺, Pb²⁺,

为最高。

Pb²⁺ 只在距地下水水位距离 1 和 22 cm 处有检出, 且以 22 cm 处浓度较高, 而在 8, 15 和 29 cm 处则未检出。

Hg²⁺ 在靠近耕层表面各层有检出, 而在近地下水水位处未能检出。其浓度最大值出现在距地下水水位距离 22 cm 处, 具有明显的聚层现象。

Cr⁶⁺ 在土层上的分布呈曲线波动, 与 Pb²⁺ 和 Hg²⁺ 的分布有所不同。其浓度较高的土层分别在距地下水水位距离 1, 15, 29 cm 处, 并以 29 cm 处为最高。Cr⁶⁺ 在各土层中的分布与 Na⁺ 较为相似。

近地表的 SO₄²⁻ 浓度远大于其他土层, 而其他各层浓度相差不大, 其总体的分布规律与 Na⁺ 极为相似。

2.4 不同污染度地下水上行时对耕层土壤污染的差异

将表 2 中处理组 I、II 和 III 不同污染度的地下水, 置于距地表 30 cm 的水位下, 测定不同土层中的 EC 值, 结果如表 3 所示。

污染地下水在不同土层中的 EC 值分布是不均

Hg²⁺, Cr⁶⁺ 和 SO₄²⁻ 在耕层中的分布结果如表 4 所示。不同污染度的污染地下水处理时, Na⁺, Pb²⁺, Hg²⁺, Cr⁶⁺ 和 SO₄²⁻ 各离子分别在土层中具有一致的分布规律, 且对单一离子来说, 随着地下水污染度的增加, 在某一土层上的离子浓度也被增大了。

3 讨论

3.1 污染地下水上行时在土壤耕层中的分布

据刘广明等的研究, 在地下水矿化度一定的条件下, 地下水蒸发量的大小, 决定了土壤累积盐分的多少^[5]。而本研究中得到, 地下水在不同质地土壤各层中的 EC 值分布均呈现出土壤表层和土壤底层较高, 而中间土层较低的规律。进一步通过同步测定土壤水分含量及蒸腾量可知, 完全浸润的耕层土壤, 在地表自然蒸发状况下, 土壤各层上 24 h 内的平均含水量

表4 不同污染度地下水离子在土壤耕层中的分布 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Table 4 The ions distribution of the groundwater with different pollution degrees in soil plough layers ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

污染度 PD	离子在土层中分布				
	Na^+	Pb^{2+}	Hg^{2+}	Cr^{6+}	SO_4^{2-}
距地下水位距离 1 cm					
对照	7.6	0.000	0.000	0.001	10.7
I	53.5	0.098	0.000	0.109	94.9
II	142.9	0.115	0.000	0.442	276.3
III	222.1	0.223	0.000	0.487	874.0
距地下水位距离 15 cm					
对照	11.1	0.000	0.000	0.002	13.3
I	89.5	0.000	0.010	0.625	402.7
II	147.7	0.000	0.013	0.663	380.7
III	235.6	0.000	0.084	1.162	1 170.0
距地下水位距离 29 cm					
对照	15.4	0.000	0.000	0.005	18.0
I	116.7	0.000	0.023	0.627	837.6
II	218.1	0.000	0.028	0.756	940.9
III	397.1	0.000	0.103	1.488	1 532.0

与距地下水位距离呈负指数式递减 ($y = 1.33\exp(-0.0024x)$, $r = -0.9604$), 由此可以得出, 无论在砂壤土、壤土还是粘壤土上, 各土层中土壤溶液的 EC 值分布与水分并不同步。本研究的结论也能很好地解释以下结果, 在设施栽培条件下长期大量施肥造成了地下水的污染, 而在设施环境下, 其温度比露地提高, 土壤的蒸发加强, 使地下水上行加剧, 而盐分随着地下水的上行, 并不是随移动距离呈线性或对数式递减, 而是在土壤表层有大量积累。

地下水水位高低也直接影响着耕层土壤内的盐分分布。本研究发现, 水位越高, 土壤耕层中水分的 EC 值总体要小得多。这是因为在较高的地下水位情况下, 耕层土壤内的水分含量变化相对稳定且能保持较高的田间持水量水平之故。

地下水的污染度也会影响到耕层土壤水分的 EC 值。本研究结果表明, 对于土壤耕层内的任一位置, 耕层土壤水分的 EC 值却随地下水污染度的增加而增加, 且以土壤表层表现得更为显著。

影响耕层土壤内水分分布主要是依靠土壤粒子的粘着力、凝聚力和地心引力作用的, 而各土层中土壤溶液 EC 值即溶质分布除了受到地下水通过毛细管作用的上行外, 还受到土壤性状、土壤环境及地下水特性等多方面的影响。由此建立起地下水离子在耕层土壤内分布的模型如下:

$$EC_i = \frac{C_0 \cdot C_g \cdot C_s \cdot C_w \cdot T_i \cdot H_{wt} \cdot f(d_i)}{\lambda(W_c + W_a)_i}$$

式中, i 为土层位置; C_0 为土壤有机质含量; C_g 为土壤比重; C_s 为土壤中固有离子含量; C_w 为地下水污染物浓度; T_i 为 i 土层温度; H_{wt} 为地下水位; $f(d_i)$ 为土层距地表距离的函数; λ 为土壤总孔隙度; W_c 为 i 土层土壤结合水含量; W_a 为 i 土层可利用水分含量。

关于造成地下水离子在耕层土壤中不均衡分布的原因, 主要是溶质的扩散、分散与对流所致^[11]。从本研究的结果来看, 这 3 种作用可能同时在起作用, 至于不同状况下其作用模式的类型及其特点, 还有待进一步提示。为了研究地下水在土壤中的上行, 本研究采用了下渗式方法, 比较符合自然状况, 其数据获得相对于将污染水从土壤顶部给予或注入式更加有针对性。然而在实际农田内, 常常由于降水和人工灌溉, 使土壤得到淋溶, 因此耕层内污染水中的离子浓度也受到这一部分水分作用的影响, 较为复杂。

3.2 地下水中几种离子在土壤耕层中的移动规律

地下水中所含离子在土壤耕层中分布所呈现出的复杂性, 正是对流、扩散和吸附共同作用的结果。土壤粒子对离子的吸附作用阻滞了污染物的迁移, 使污染物的迁移速度比地下水的运移速度慢。

SO_4^{2-} 和 Na^+ 是构成地下水盐分的主要离子。两者在土壤耕层中分布情况相似。 SO_4^{2-} 和 Na^+ 随着水分移动而对流, 同时也顺浓度梯度扩散, 使这两种离子有向土壤表层迁移的趋势。 SO_4^{2-} 和 Na^+ 在土壤中相对迁移能力较高, 容易累积于土壤表层造成表土层盐渍化。 SO_4^{2-} 作为污染水中重要的阴离子, 它在耕层土壤中的分布直接决定着阳离子的分布情况。部分 SO_4^{2-} 可能会与某些离子形成难溶性盐而减少土壤中离子态的浓度。阻滞 Na^+ 向表层迁移的吸附作用主要是与土壤中 Ca^{2+} , Mg^{2+} 发生的可逆性阳离子交换。随着地下水污染度的增加, SO_4^{2-} 和 Na^+ 在土壤中的对流和扩散作用也有所增加, 各土层上的离子浓度也就加大了。

Cr^{6+} 在耕层中的存在形态主要以 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 和 CrO_4^{2-} 为主, 因此 Cr^{6+} 具有良好的溶解性与渗透性。本研究中 Cr^{6+} 在耕层中均有检出, 表现为土壤表层含量较高, 这与 Pb^{2+} 和 Hg^{2+} 在土层中的分布不同。说明 Cr^{6+} 在污染地下水上行过程中, 除在耕层土壤底部中的被还原和吸附外, 向上渗透的比例较高。本研究的结果也表明, 在低地下水位的处理中, Cr^{6+} 在土层底部吸附达到土壤粒子饱和状态后, 其余部分到达土层表面, 因此表层的浓度相对高地下水位处理者要低, 这

—结果与宋国慧等人^[6]的结果相类似。

Hg^{2+} 随水分在土壤中的迁移力强于 Pb^{2+} , 而弱于 Cr^{6+} 。本研究的结果表明, Hg^{2+} 在各土层中的含量随地下水污染度有所不同。中度污染的地下水中 Hg^{2+} 分布是在近土壤表层含量较高。而轻度和重度污染下, 则是越靠近土壤表层 Hg^{2+} 含量越高。因此可以看到, 地下水中的 Hg^{2+} 对土壤的污染, 是由下向上连续分布的, 由于受到自身向土壤表层迁移的影响, 出现了明显的分层现象。这一点与朱峰等人^[7]在越流含水层上所做的结果有相似, 但其污染是模拟土壤中自上而下的过程。

Pb^{2+} 在土层中的分布受到土壤溶液中离子形态、电荷、氧化还原电位水平及 pH 值等的影响, 除了与 SO_4^{2-} 发生结合而沉积在土壤底层外, 它还可能与土壤溶液中的 OH^- 和 CO_3^{2-} 等形成络合态, 能够随水分的移动而分布到耕层土壤的各层中^[8]。因此 Pb^{2+} 在土层内的分布常常没有明显的规律可言。但是土壤底层中的铅往往呈非离子态, 所以底层中 Pb^{2+} 含量能检测到的很少。

3.3 克服地下水对土壤污染的途径

污染地下水中的盐分易在土壤中上行并在其表层积累, 造成耕层土壤的盐渍化, 通常可采取客土、淋溶、植物吸收和物理阻隔等方法加以防止^[10]。根据地下水盐分在土壤中的分布情况, 可用于指导确定换土法、物理阻隔法及淋溶法冲洗后的排水在土层中应置的位置。

对于地下水中重金属引起的土壤污染, 除了可采用上述方法进行治理外, 还可应用电解、热处理、隔离包埋、蚯蚓修复以及微生物修复等技术。重金属在土壤中分布复杂, 需根据针对的具体重金属而应用适当的技术方法。

通过揭示地下水溶质在土壤中的迁移规律, 可对地下水引起的土壤盐渍化和重金属污染治理提供理论依据, 使污染治理更为有效。

4 结论

污染地下水在砂壤土、壤土和粘壤土中上行时

EC 值分布规律相似, 其共同特点是土壤底层和表层处 EC 值较高。随着土壤质地由轻变重, 地下水上行时 EC 值分布的最低值有随近底层向土壤表层移动的规律, 而且轻质土耕层内水分 EC 变幅较大。地下水水位越高, 土壤耕层中水分的 EC 值总体较小。不同污染度地下水在各土层中分布规律基本一致。

地下水中 Na^+ 和 SO_4^{2-} 分布以表层浓度较高, 其他层上浓度较低。这 2 种离子在土壤中相对迁移能力较强。 Cr^{6+} 在土壤表层分布浓度较高, Hg^{2+} 在近地表层浓度较高, 而 Pb^{2+} 在土层上的分布没有明显规律。对单一离子来说, 随着地下水污染度的增加, 在某一土层上该离子的浓度也有所加大。

参考文献:

- [1] 刘兆昌, 等. 地下水系统的污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991.
- [2] 杨建峰, 刘士平, 等. 地下水潜埋条件下土壤水动态变化规律研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(3): 25 - 28.
- [3] 张学英. 潜水蒸发与土质及地下水埋深关系[J]. 地下水, 2002, 24(1): 8 - 9.
- [4] 陈亚新, 等. 地下水与土壤盐渍化关系的动态模拟[J]. 水利学报, 1997, 5: 77 - 83.
- [5] 刘广明, 杨劲松. 地下水作用条件下土壤积盐规律研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 65 - 69.
- [6] 宋国慧, 史春安. 铬在包气带的垂直污染机理研究[J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(2): 56 - 58.
- [7] 朱 峰, 黄 海, 薛禹群, 吴吉春. 越流含水层系统地下水有毒元素污染数值模拟——以太原盆地地下水汞污染为例[J]. 环境科学, 1999, 20(1): 55 - 58.
- [8] 钱云平. Pb(II)在地下水环境中迁移的机理及模型研究[J]. 水资源保护, 1997, (4): 16 - 19.
- [9] Thomas Harter. Reference: Groundwater quality and ground water pollution. FWQP reference sheet, 11. 2. <http://groundwater.ucdavis.edu/Publications>.
- [10] Morris J D, Collopy J J. Water use and salt accumulation by Eucalyptus camaldulensis and Eucalyptus camaldulensis on a site with shallow saline groundwater[J]. Agriculture Water Management, 1999, 39(2 - 3): 205 - 227.
- [11] 日本環境省. 土壤環境. <http://133.5.207.201/Textbook/keika/> 概論 PDF/g3. 1. pdf.