

四川盆地西部漂洗土壤区水体铁元素的分布特征

袁大刚, 谭海燕, 杨大东, 吴德勇

(四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014)

摘要:铁是水质监测的重要指标。为了弄清四川盆地西部漂洗土壤区不同水环境中铁的形态和含量、浅层潜水的季节动态及其形成原因,为该区土、水资源合理利用提供一定参考,于不同时期在四川省名山县漂洗土壤区采集潜水、池塘水、稻田和茶园沟渠地表水、土壤孔隙水及相应的土壤样品,分析了其铁的形态和含量及相应的理化性质。结果表明,从潜水和土壤孔隙水来看,潜水总铁和亚铁含量(分别为 0.30 、 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)均为最低,稻田孔隙水总铁和亚铁含量(分别为 2.92 、 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)均为最高,茶园孔隙水总铁和亚铁含量(3 a 生以下茶园分别为 1.25 、 $0.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 6 a 生以上茶园分别为 2.66 、 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)居中;就稻田和茶园的土壤孔隙水与沟渠地表水比较而言,孔隙水总铁和亚铁含量总体上高于沟渠地表水相应的总铁和亚铁含量;潜水总铁和亚铁含量分别变动在 $0 \sim 0.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0 \sim 0.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,其季节动态在不同区域间存在一定差异,与其所处地形部位及地表径流条件、离居民房屋和畜禽圈舍远近、土壤 pH、有机质和铁元素的形态和含量、土地利用方式及作物种植年限、天气状况及水井自身氧化还原电位等条件有关。

关键词:潜水;孔隙水;地表水;铁;季节动态;稻田;茶园

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)06-1108-06

Distribution of Iron in Water in Bleached Soil Region of the West Sichuan Basin, China

YUAN Da-gang, TAN Hai-yan, YANG Da-dong, WU De-yong

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

Abstract: Iron is the important index of water quality monitoring. To study the iron form and content in different water body and the seasonal dynamic of groundwater in bleached soil area in the west of Sichuan Basin, surface and ground water samples from well, pool, paddy field and tea garden, and soil samples from paddy field and tea garden were collected in Mingshan County, Sichuan Province at different time, then the form and content of iron, and other basic chemical properties in water and soil were analyzed. The results showed that the content of total and ferrous iron in groundwater ($0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively) was the lowest, and that in porewater from paddy field ($2.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively) was the highest. The content of total and ferrous iron in porewater from paddy field was higher than that from tea garden ($1.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ from less than 3 years tea garden, $2.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ from more than 6 years tea garden). The content of total and ferrous iron in porewater was higher than that in surface water. The content of total iron varied from 0 to $0.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the ferrous iron content varied from 0 to $0.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and seasonal dynamic of iron in groundwater in different area was different. These were related to topography position, surface runoff condition, distance to house of human and animal, soil pH, form and content of organic matter and iron in soil, type and time of land use, weather status and micro-environment of well itself.

Keywords: groundwater; porewater; surface water; iron; seasonal dynamics; paddy field; tea garden

铁是地球上分布最广的金属元素之一,水体中铁含量的高低对人类健康和生产生活有巨大影响,因此铁含量成为水质监测的重要指标——我国饮用水卫生标准^[1]和地下水质量标准^[2]均规定铁元素含量不应

超过 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。生命、生产和生活所需的各类地表水和地下水经常与大气、土壤、生物等自然体进行物质交换,不同形式水体之间经常进行物质交换^[3-5],同一水体内部也存在物理、化学、生物和生态变化^[6-7],其化学成分处于动态变化中。工农业生产等人类经济活动可使水质发生变化^[4,8-9],了解人类活动与水质变化之间的关系,对于协调人水关系同样具有重要意义,但迄今未见土地利用从稻田改为茶园后水体中铁形态与含量变化的报道。

收稿日期:2010-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(40801079);四川省科技富民强县重点项目(07NG001-020)

作者简介:袁大刚(1975—),男,重庆云阳人,博士,副教授,主要从事土壤资源可持续利用研究。E-mail:gangday@sohu.com

漂洗土壤是铁锰经历强烈还原淋溶的独特土壤类型,铁的淋失现今仍在进行^[10-11],无疑对地表水和地下水铁的形态和含量具有重要影响。在四川盆地西缘开展的浅层地下水铁锰空间分布特征研究中,发现冰碛物及冰水沉积物母质发育的土壤区有更多的铁游离出来而进入附近地下水中^[12]。鉴于此,本研究在由冰碛物及冰水沉积物母质发育的漂洗土壤区,于不同时间,采集潜水、池塘水、稻田和由稻田改造而成的茶园沟渠地表水、土壤孔隙水及相应的土壤样品,测定不同形态铁的含量及理化性质,分析不同土地利用条件下水体铁元素形态与含量动态变化特征及其影响因素,为本区水资源合理利用提供依据。

1 材料与方法

研究区地处四川盆地西缘的名山县,属亚热带季风性湿润气候,终年云雾缭绕,雨量充沛,温暖湿润,年均气温 15.4℃,年均降水量 1 500 mm。地形为老冲积(第四纪更新统沉积物——冰碛物及冰水沉积物)台地——由第三至第五级阶地构成,漂洗土壤集中分布在这些阶地上。由于面积广大,地势平坦,早已被开垦为耕地,实行水旱轮作。但近年来由于农业结构调整,这些脱硅富铁铝化和漂洗作用同时较强进行的酸性水旱轮作田^[13]大部分被改造为能获取更高经济效益的茶园。

1.1 样品采集

在名山县漂洗土壤集中分布的五里口、和尚垆和城东乡(分别处于第三、四、五级阶地——以Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ表示)各选取 1 口浅层潜水水井(埋深 2~8 m),于 2009 年 5、7、9 月和 2010 年 1、3、5 月采集潜水(G),水位 1.5~5 m;在采集潜水的同时,采集附近池塘(P)、稻田(D)、1~3 a 生茶园(C3)和 6~7 a 生茶园(C6)的沟渠地表水(分别以 SP、SD、SC3 和 SC6 表示)、稻田和茶园的土壤孔隙水(分别以 PD、PC3 和 PC6 表示)以及相应的土壤样品。

潜水和池塘地表水用特氟龙水斗取样器采集,取样深度为距水面 80 cm 深度处。土壤孔隙水是在用不锈钢土壤采样环工具等间距(10 cm)钻取土壤至 110 cm 深度后,用特氟龙水斗取样器在钻孔里采集的。稻田和茶园地表水用洗净的 550 mL 容量的纯净水塑料瓶直接在田间沟渠采集。稻田、茶园地表水和土壤孔隙水不能保证每次采集潜水的同时都能采集得到。同一个地方的水样共采集 2 瓶(550 mL 容量的纯净水塑料瓶),其中一瓶不加任何试剂,供测定 pH 和 Eh

用,另一瓶加优级纯盐酸 10 mL,供测定总铁和亚铁用。采样时,水样注满样品瓶后盖严瓶盖,保存于装有冰冻水的塑料箱。

土壤样品分为新鲜土样和风干土样,新鲜土样用于测定亚铁,风干土样用于测定总铁、游离铁、活性铁和络合铁,用于亚铁测定的新鲜土样用塑料自封袋密封保存于装有冰冻水的塑料箱。在样品采集完之后,水样和新鲜土样被立即带回室内,进行相应指标的测定。需风干的土壤样品立即在干净、阴凉、通风的地方晾干,然后磨细、过筛备用。

本研究中,水样 6 次共采集 51 个(用于测总铁和亚铁的各 51 个,下同),其中潜水 18 个,池塘地表水 11 个,稻田地表水 3 个,稻田孔隙水 3 个,1~3 a 生茶园沟渠地表水 3 个,1~3 a 生茶园孔隙水 4 个,6~7 a 生茶园沟渠地表水 6 个,6~7 a 生茶园孔隙水 3 个。土样 6 次共采集 594 个,其中稻田、1~3 a 生茶园和 6~7 a 生茶园各 198 个。

1.2 指标及其测定方法

(1)水样:在室内经中速定量滤纸过滤后,pH 用酸度计测定;Eh 用氧化还原电位计测定;总铁(Fe^{T})和亚铁(Fe^{2+})用邻菲罗啉分光光度法测定^[13]。

(2)土样:亚铁($\text{Fe}(\text{II})$)用硫酸铝浸提,总铁(Fe^{T})用盐酸-硝酸-高氯酸消化,游离铁(Fe^{d})用 DCB 浸提,活性铁(Fe^{e})用酸性草酸铵浸提,络合铁(Fe^{p})用磷酸二氢钠浸提,最后均用邻菲罗啉分光光度法测定^[14]。在 594 个土样中,实际只测了 2009 年 5 月至 2010 年 3 月的 3 个阶地共 495 个土样的亚铁,第四级阶地 165 个土样的总铁、游离铁、活性铁和络合铁。

1.3 数据处理与分析

用 Excel 2003 软件进行常规统计分析并作图,用 SPSS for Windows 15.0 软件做相关分析、方差分析与多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同类型水体中铁含量的分布特征

从潜水与土壤孔隙水来看(图1),不管是总铁含量还是亚铁含量,均为潜水最低(总铁和亚铁的平均含量分别为 0.30、0.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),稻田孔隙水最高(总铁和亚铁的平均含量分别为 2.92、1.13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),茶园孔隙水居中(总铁和亚铁平均含量在 1~3 a 生茶园里分别为 1.25、0.92 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,6~7 a 生茶园里分别为 2.66、0.65 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

就地下水与地表水相比较而言,潜水总铁和亚铁

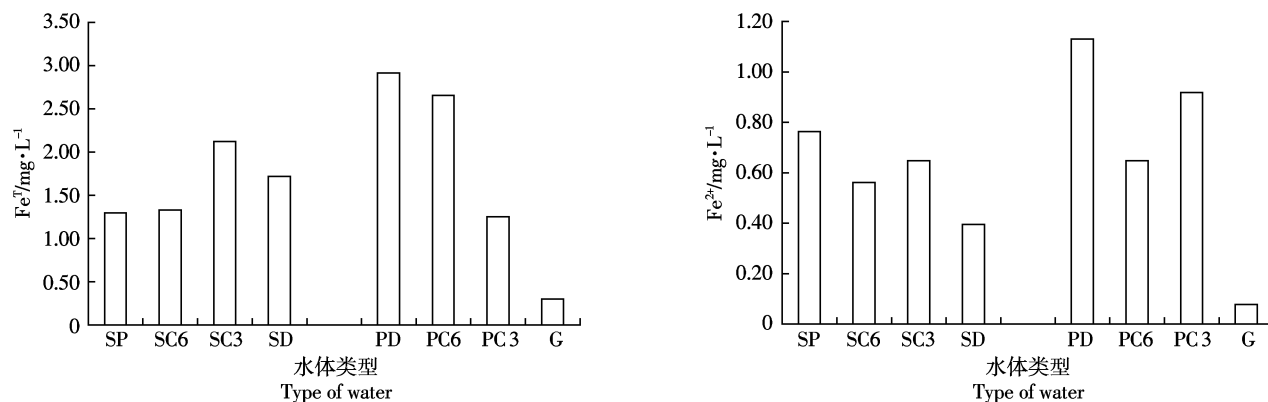


图 1 漂洗土壤区各水体总铁和亚铁含量比较

Figure 1 Comparison of the contents of total and ferrous iron in different water bodies in bleached soil area

平均含量均低于池塘、稻田和茶园沟渠中地表水相应的总铁和亚铁平均含量,稻田和茶园土壤孔隙水总铁与亚铁平均含量总体而言也高于相应的沟渠地表水总铁和亚铁平均含量(图 1)。

2.2 潜水铁的季节动态

潜水总铁含量波动于 $0\sim 0.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围,而亚铁含量变化在 $0\sim 0.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间(图 2)。由此可见,潜水总铁和亚铁含量在部分时段超过 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即超过生活饮用水卫生标准^[1]和地下水质量三级标准^[2],给居民生活带来一定影响。从图 2 还可以看出,虽然均处于漂洗土壤区,但在不同区域,潜水铁的季节动态存在一定的差异:第四级阶地上潜水总铁和亚铁均在 9 月份上升到最高值,而第三级阶地和第五级阶地潜水总铁在 9 月份下降至最低值;第五级阶地亚铁含量总体低于第三级阶地和第四级阶地,甚至很多时段用本研究所采用的方法未检出。

3 讨论

3.1 不同类型水体中铁迁移转化的控制因素

从地下水总铁和亚铁平均含量来看,稻田孔隙水最高,潜水最低,茶园土壤孔隙水居中,这主要是由于稻田在淹水季节土壤氧化还原电位较低,易于形成还原态铁;同时,稻田土壤有机质含量较高,铁与其形成有机络合物,从而提高孔隙水中铁的溶解度^[6-7];此外,漂洗土壤由于盐基大量淋失而呈酸性,也有利于孔隙水中铁浓度的提高^[5,7]。而茶园土壤不像稻田有季节性淹水形成的铁还原溶解,孔隙水中的铁主要是络合溶解和酸性溶解^[6-7]。潜水铁含量较低还可能与水井建造时使用石灰、水泥等碱性材料砌筑井壁,一方面阻止土壤渗漏液侧渗进入水井,另一方面提高了潜水 pH,从而使铁的溶解度降低有关。

从地表水与地下水的比较来看,潜水总铁和亚铁

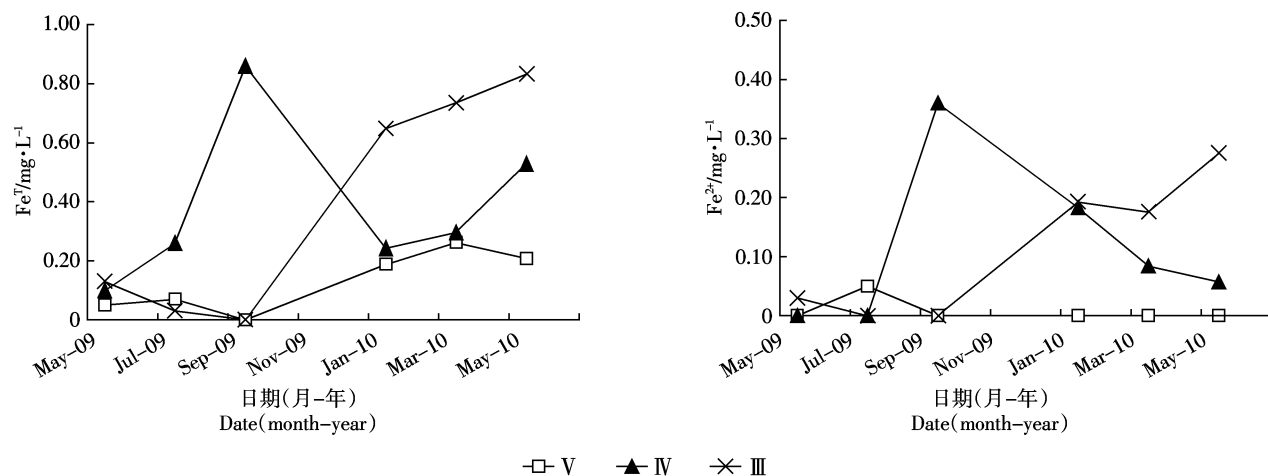


图 2 漂洗土壤区潜水铁的季节动态

Figure 2 Seasonal dynamic of iron in groundwater in bleached soil area

平均含量低于池塘地表水、稻田和茶园沟渠地表水的铁含量,其原因与潜水铁含量低于孔隙水铁含量原因相同。稻田和茶园孔隙水总体上高于沟渠地表水,与孔隙水处于离地表较深处,有利于铁的还原溶解有关。

3.2 不同区域潜水铁的季节动态差异

虽然同处漂洗土壤区,但在不同阶地上潜水铁的季节性变化表现出一定差异。第四级阶地潜水铁的季节动态与预期结果基本相符:5月份采样时水稻还没移栽,仅少量秧田淹水育秧,大部分稻田处于油菜收获时期,并未淹水,同时降水较少,土壤中铁元素很难迁移到水井中,因此潜水的总铁含量较低;5月后稻田淹水种稻直至9月中下旬收获,铁易于酸性、还原、络合迁移至水井中,所以这期间潜水的总铁含量较高;水稻收获后落干种植油菜至第二年5月,这期间潜水中总铁呈下降趋势;冬春季节降水较少,铁的迁移能力较弱,因此潜水的总铁含量也较低。

与第四级阶地潜水总铁含量变化不同,第三级阶地和第五级阶地潜水总铁在9月份降至最低值,这可能与水井所处部位地形、径流条件、水井内部微环境、人类活动、采样前的天气状况等有关^[4-8]。第四级阶地的水井在地形上处于较高位置,离居民房屋、畜禽圈舍最近,周围枯枝落叶量也较大,土壤颜色较黑,预示土壤有机质和潜水中可溶性有机物较丰富,水井内部易于形成还原微环境,有机物与铁络合也提高了其溶解度和迁移能力;同时,夏季强降水形成的地表径流对其影响较小,从而导致潜水中获得较高的总铁含量。而第三级阶地和第五级阶地的水井离居民房屋和畜禽圈舍相对较远,受人类活动影响较小,且水井在地形上处于阶坡,低于阶地表面,夏季降水形成的地表径流可能直接进入水井中而稀释铁的浓度。

第五级阶地潜水亚铁含量总体低于第三、四级阶地潜水亚铁含量,可能还与水井周围其人口密度相对较小,人类活动的影响也相对微弱有关。

3.3 潜水铁含量与潜水性质和土壤铁的关系

铁是变价元素,在潜水中的含量受其自身 pH 和 Eh 等影响。在本研究中,潜水 pH 值介于 5.89~7.34 之间,Eh 介于 352~595 mV 之间。潜水总铁与潜水 pH 值的负相关关系不显著,而与潜水 Eh 呈极显著负相关关系。潜水亚铁与潜水 pH 和 Eh 的相关关系均不显著(表 1),这可能是由于亚铁进入水井后很快被氧化而成为高价铁。

土壤中的铁是浅层地下水中铁的重要来源,以酸性溶解、还原溶解和络合溶解等方式而成为溶解状态^[7],水田改为旱地可改变土壤 pH、Eh 和有机质含量等理化性质,从而影响各形态铁的转化与迁移。以第四级阶地为例,稻田土壤各形态铁特别是活性较高的亚铁、游离铁、活性铁和络合铁含量均较高(表 2),是孔隙水总铁和亚铁含量均最高的原因。

相关分析结果(表 1)显示,潜水总铁与 1~3 a 生茶园土壤中部亚铁呈显著正相关关系,与 1~3 a 生茶园土壤底层络合铁呈极显著正相关关系,表明潜水中总铁主要来源于土壤中下部迁移能力较强的亚铁和络合铁。潜水总铁与潜水亚铁含量呈显著正相关关系,进一步表明潜水中总铁主要来源于土壤中的亚铁。潜水总铁与稻田土壤底层总铁呈显著负相关关系,其原因有待于进一步研究。

相关分析结果(表 1)也显示,潜水亚铁与 1~3 a 生茶园和 6~7 a 生茶园土壤土体中部的亚铁分别呈极显著和显著正相关关系,表明潜水亚铁主要来源于茶园土壤中部亚铁渗漏或侧渗;与 1~3 a 生茶园土壤底

表 1 漂洗土壤区潜水铁与 pH、Eh 及各形态铁间的相关性

Table 1 Correlation between iron in groundwater and pH, Eh and iron form in bleached soil area

	Fe _C ^①	Fe _C ^②	pH _C ^③	Eh _C ^④	Fe _{PO6} ^⑤	Fe _{PO6} ^⑥	Fe _{Dm} ^⑦	Fe(II) _{C3m} ^⑧	Fe(II) _{C5m} ^⑨	Fe _{Dm} ^⑩	Fe _{C3h} ^⑪
Fe _C ^①	1	0.864*	-0.027 ns	-0.910**	-0.015ns	-0.149ns	-0.881*	0.567*	0.384ns	-0.774ns	0.960**
Fe _C ^②	0.864*	1	0.168 ns	-0.732ns	0.924**	0.977**	-0.699 ns	0.658**	0.527*	-0.970**	0.908*

注:①.潜水总铁;②.潜水亚铁;③.潜水 pH;④.潜水 Eh;⑤.6~7 a 生茶园土壤孔隙水总铁;⑥.6~7 a 生茶园土壤孔隙水亚铁;⑦.稻田底层土壤(100~110 cm)总铁;⑧.1~3 a 生茶园中部(50~60 cm)土壤亚铁;⑨.6~7 a 生茶园中部(50~60 cm)土壤亚铁;⑩.稻田中部(50~60 cm)土壤活性铁;⑪.1~3 a 生茶园底层(100~110 cm)土壤络合铁。*表示相关性显著,**表示相关性极显著,ns表示相关性不显著。

Note: ①Total iron concentration of groundwater; ②Ferrous iron concentration of groundwater; ③pH of groundwater; ④Eh of groundwater; ⑤Total iron concentration of soil porewater in tea garden of 6~7 years old; ⑥ Ferrous iron concentration of soil porewater in tea garden of 6~7 years old; ⑦ Total iron content of bottom soil layer(100~110 cm)in paddy field; ⑧ Ferrous iron content of middle soil layer(50~60 cm)in 1~3 years old tea garden; ⑨ Ferrous iron content of middle soil layer(50~60 cm)in 6~7 years old tea garden; ⑩ Amorphous iron content of middle soil layer(50~60 cm)in paddy field; ⑪ Organically-bound iron content of bottom soil layer(100~110 cm) of 1~3 years old tea garden. *: Correlation is significant at the 0.05 level; **: Correlation is significant at the 0.01 level; ns: no significance.

表 2 第四级阶地不同土地利用条件下土壤各形态铁的平均值及多重比较结果

Table 2 Mean of different iron form and its multiple comparison on the fourth stage terrace

土地利用类型 Type of land use	土壤类型 Soil type	Fe ²⁺ /g·kg ⁻¹	Fe(Ⅱ)/g·kg ⁻¹	Fe ³⁺ /g·kg ⁻¹	Fe ^o /g·kg ⁻¹	Fe ^t /g·kg ⁻¹
D	漂洗水稻土 ^①	34.12 a	0.27 a	10.64 a	2.54 a	1.44 ab
C3	漂洗水稻土 ^①	33.81 a	0.09 b	10.82 a	2.10 b	1.12 b
C6	漂洗水稻土 ^①	28.33 b	0.18 ab	7.56 b	2.40 a	1.61 a

注:在同一列中有相同字母的无显著性差异($P<0.05$)。

Note: For each columns, means with the same letter are not significantly different at 5% level according to LSD test. ①: Bleached paddy soil

层络合铁也呈显著正相关,表明络合铁中亚铁所占比例较高,或者说络合铁易于转化为亚铁;其与 6~7 a 生茶园孔隙水的总铁和亚铁均呈极显著正相关关系证明了这一推论。潜水亚铁与稻田土壤土体中部的活性铁呈极显著负相关关系,其原因有待进一步研究。

4 结论

通过对四川盆地西缘名山县漂洗土壤区潜水、池塘地表水、稻田和茶园沟渠地表水、土壤孔隙水及相应土壤样品的野外调查采样和室内分析,结果表明:

(1)由于漂洗土壤区稻田环境利于铁的酸性、还原和络合溶解,其孔隙水总铁和亚铁含量均为最高;由于稻田有较长时间的淹水还原环境,其孔隙水总铁和亚铁含量分别高于茶园孔隙水总铁和亚铁含量;由于土壤下部缺乏氧气而易于铁的还原溶解,土壤孔隙水总铁和亚铁含量总体上高于相应的沟渠地表水总铁和亚铁含量。

(2)漂洗土壤区潜水总铁和亚铁低于周围池塘地表水、稻田和茶园沟渠地表水及土壤孔隙水相应的总铁和亚铁含量,并且存在季节性变化,但在不同区域,其季节动态有一定差异,这与其所处地形部位及地表径流条件、离居民房屋和畜禽圈舍远近、土壤有机质多少和铁的形态与含量、土地利用方式及相应种植年限、大气状况及水井自身氧化还原电位等条件有关。

本研究初步弄清了漂洗土壤区潜水、池塘水、稻田和由稻田转变而成的茶园的土壤孔隙水和沟渠地表水中总铁和亚铁的分布特征,并探讨了潜水铁的季节动态及其影响因素,可为该区土、水资源合理利用提供一定参考。

参考文献:

[1] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB 5749—2006 生活饮用水卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.

Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 5749—2006 Standards for Drinking Water Quality [S]. Beijing:Standards Press of

China, 2007.

[2] 国家环境保护总局. GB/T 14848—1993 地下水质量标准 [S]. 北京:中国标准出版社, 1994.

State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. GB/T 14848—1993 Quality Standard for Groundwater[S]. Beijing:Standards Press of China, 1994.

[3] 吴丰昌,万国江,蔡玉蓉,等. 控制湖泊水体化学组成的地球化学原理研究[J]. 水科学进展, 1997, 8(2):169-175.

WU Feng-chang, WAN Guo-jiang, CAI Yu-rong, et al. Geochemical mechanisms controlling basic chemical compositions of lake water mass[J]. *Advances in Water Science*, 1997, 8(2):169-175.

[4] 杨建中. 地下水动态的影响因素分析[J]. 科技情报开发与经济, 2008, 18(9):121-122.

YANG Jian-zhong. Analysis on the factors influencing the groundwater regime[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2008, 18(9):121-122.

[5] 曾昭华. 地下水中铁元素的形成及其控制因素[J]. 江苏地质, 2003, 27(4):220-224.

ZENG Zhao-hua. Formation of Fe element in groundwater and its control factors[J]. *Jiangsu Geology*, 2003, 27(4):220-224.

[6] 吴敦敖,翁焕新. 地下水介质环境对铁锰离子含量影响的研究[J]. 浙江大学学报, 1987, 21(5):54-62.

WU Dun-ao, WENG Huan-xin. Study of the influence of the medium environment of ground water on contents of iron and manganese ions[J]. *Journal of Zhejiang University*, 1987, 21(5):54-62.

[7] 张锡辉. 铁在饮用水水源中的循环转化[J]. 给水排水, 1999, 25(11):18-22.

ZHANG Xi-hui. Iron cycles in water sources[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 1999, 25(11):18-22.

[8] 董维红,廖资生,朱雪芹,等. 人类活动对哈尔滨市高铁地下水时空分布的影响[J]. 水文, 2005, 25(3):15-19.

DONG Wei-hong, LIAO Zi-sheng, ZHU Xue-qin, et al. Impact of human activities on spatial-temporal distribution of groundwater with high iron concentration in Harbin City[J]. *Hydrology*, 2005, 25(3):15-19.

[9] 潘月鹏,阎百兴,徐治国,等. 三江平原湿地开垦对地表水中可溶性铁分布特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):899-903.

PAN Yue-peng, YAN Bai-xing, XU Zhi-guo, et al. Impact of reclamation activities on water-soluble ionic iron distribution of surface water in the Sanjiang Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):899-903.

[10] 于天仁,谢建昌,杨国治,等. 太湖流域低产“白土”的成因及其改良[J]. 土壤学报, 1959, 7(1-2):42-58.

- YU Tian-ren, XIE Jian-chang, YANG Guo-zhi, et al. Studies on the infertile "White Soil" in Tai Lake region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1959, 7(1-2):42-58.
- [11] 刘世全, 刘应章, 伍先菊. 四川白鱗泥的发生特点及肥力特征[J]. 四川农业大学学报, 1990, 8(4):284-297.
- LIU Shi-quan, LIU Ying-zhang, WU Xian-ju. The properties of genesis and fertility of Sichuan bleached soil[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 1990, 8(4):284-297.
- [12] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 四川盆地西缘浅层地下水铁、锰含量的空间变异特征[J]. 生态学报, 2009, 29(2):797-803.
- HU Yu-fu, , DENG Liang-ji, ZHANG Shi-rong, et al. Spatial variability of iron and manganese contents in shallow groundwater in the west of Sichuan Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2):797-803.
- [13] 国家环境保护总局. HJ/T 345—2007 水质·铁的测定·邻菲罗啉分光光度法(试行)[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2007.
- State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. HJ/T 345—2007 Water quality—determination of iron—phenanthroline spectrophotometry (Try Out)[S]. Beijing:China Environmental Science Press, 2007.
- [14] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 第二版. 北京:中国农业出版社, 2006:161-165.
- National Agricultural Technique Extension and Service Center. Soil analysis technology standard[M]. 2nd edition, Beijing:China Agriculture Press, 2006:161-165.